



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

OPTIMALIZACE LASEROVÉHO PŘIVAŘOVÁNÍ TVRDOKOVOVÝCH ŘEZNÝCH DESTIČEK NA NOSNOU TRUBKU

OPTIMIZATION OF LASER WELDING OF CARBIDE CUTTING PLATES ON A SUPPORT TUBE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Master's thesis

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. MATEJ FRANKO

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. RNDr. LIBOR MRŇA, Ph.D.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Matej Franko

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Optimalizace laserového přivařování tvrdokovových řezných destiček na nosnou trubku

v anglickém jazyce:

Optimization of laser welding of carbide cutting plates on a support tube

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při jádrovém vrtání betonu se využívá nosná trubka s tvrdokovovými řeznými destičkami. Jednou z možných technologií napojení destičky na trubku je laserové svařování. Cílem práce je studovat závislost mezi pevností a kvalitou svaru na svařovacích parametrech a na základě souboru svařovacích zkoušek vybrat optimální parametry s ohledem na pevnost svaru a svařovací čas.

Cíle diplomové práce:

Osvojit si technologii svařování laserem. Navrhnout metodiku experimentu. Provést mechanické zkoušky a vyhodnotit strukturu svarů. Komplexně posoudit vliv svařovacích parametrů na výsledný svar.

Seznam odborné literatury:

- 1.BENKO B., FODEREK P., KOSEČEK M., BIELAK R.I: Lasrové technológie,1.vyd., Bratislava, Vydavateľstvo STU, 2000, edice 4859, ISBN 80-227-1425-9
- 2.DULEY W.W.: Laser welding, New York 1999, A.Wiley-Interscience publication, ISBN 0-471-24679-4
- 3.TURŇA M., Špeciálne metódy zvarovania, ALFA Bratislava, 1989, ISBN 80-05-00097-9
- 4.KOLEKTIV AUTORŮ. Materiály a jejich svařitelnost, 1.vyd. Zeross, Ostrava 2001, 292s. ISBN 80-85771-85-3
- 5.KOLEKTIV AUTORŮ. Technologie svařování a zařízení, 1.vyd. Zeross, Ostrava 2001, 395s. ISBN 80-85771-81-0
- 6.KOLEKTIV AUTORŮ. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování, 1.vyd. Zeross, Ostrava 2000, 214s. ISBN 80-85771-72-1

Vedoucí diplomové práce: doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 19.11.2013

L.S.

licenční zmluva

ABSTRAKT:

Bc. Franko Matej: OPTIMALIZACE LASEROVÉHO PŘIVAŘOVÁNÍ TVRDOKOVÝCH ŘEZNÝCH DESTIČEK NA NOSNOU TRUBKU

Práca pojednáva o možnostiach výroby jadrového vrtáku. Jednou z nich je technológia laserového zvarania, ktoré bolo popísane v teoretickej časti práce. V praktickej časti boli na vláknovom lasery Yb-YAG experimentálne vytvorené dva jadrové vrtáky. Na prvom z nich boli testované rôzne parametre zvarania a následne skúšané a vyhodnotené. Výsledky sú uvedené v závere práce. Druhý vrták bol zvarený z najlepších vyhodnotených parametrov v prípravku, ktorý bol pre tento účel špeciálne skonštruovaný.

Kľúčové slová: laserové zvaranie, jadrové vŕtanie, rezná doštička

ABSTRACT:

Bc. Franko Matej: OPTIMIZATION OF LASER WELDING OF CARBIDE CUTTING PLATES ON A SUPPORT TUBE

My thesis is considering the options of manufacturing of the core drill. One of these options is technology of the laser welding, which was described in details in the theoretical part of this thesis. In applied part of this thesis there were experimentally manufactured two pieces of core drills by using Yb-YAG fibre laser technology. One core drill was used for testing of the welding parameters and in the next step, these parameters were applied in real working conditions and were evaluated in final. Result is written down in the final part of my thesis. The second core drill was welded using the best values measured in the fixture, which was especially designed for this purpose.

Key words: laser welding, core drilling, cutting plate

FSI VUT	DIPLOMOVÁ PRÁCA	List 6
---------	-----------------	--------

BIBLIOGRAFICKÉ CITACE

FRANKO, Matej. *Optimalizace laserového přivařování tvrdokovových řezných destiček na nosnou trubku*. Brno, 2015. 58s, 6 výkresů, 3 přílohy, CD. Diplomová práce Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí práce: doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D..

FSI VUT	DIPLOMOVÁ PRÁCA	List 7
---------	-----------------	--------

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som diplomovú prácu na tému *Optimalizace laserového privařování tvrdokovových řezných destiček na nosnou trubku* vypracoval samostatne s použitím uvedenej literatúry a prameňov uvedených na zozname, ktorý tvorí prílohu tejto práce.

V Brne dňa 24.5.2015

.....

Matej Franko

FSI VUT	DIPLOMOVÁ PRÁCA	List 8
---------	-----------------	--------

POĎAKOVANIE

Rád by som poďakoval doc. RNDr. Liborovi Mrňovi, Ph.D. za, trpezlivosť a cenné rady ohľadom mojej diplomovej práce. Taktiež mojej žene, rodine a priateľom ktorý mi počas môjho štúdia pomáhali.

Táto práca vznikla s podporou Európskej komise a Ministerstva školství mládeže a tělovýchovy České republiky (projekt. č. CZ.1.05/2.1.00/01.0017) "ALISI - Centrum pokročilých diagnostických metod a technologií" a tento je ďalej podpořen z Národního programu udržitelnosti I.- NPU I (LO1212), jehož cílem je podpora výzkumu, experimentálního vývoje a inovací z veřejných prostředků.

FSI VUT	DIPLOMOVÁ PRÁCA	List 9
---------	-----------------	--------

OBSAH

ZADANIE

ABSTRAKT

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

POĎAKOVANIE

OBSAH

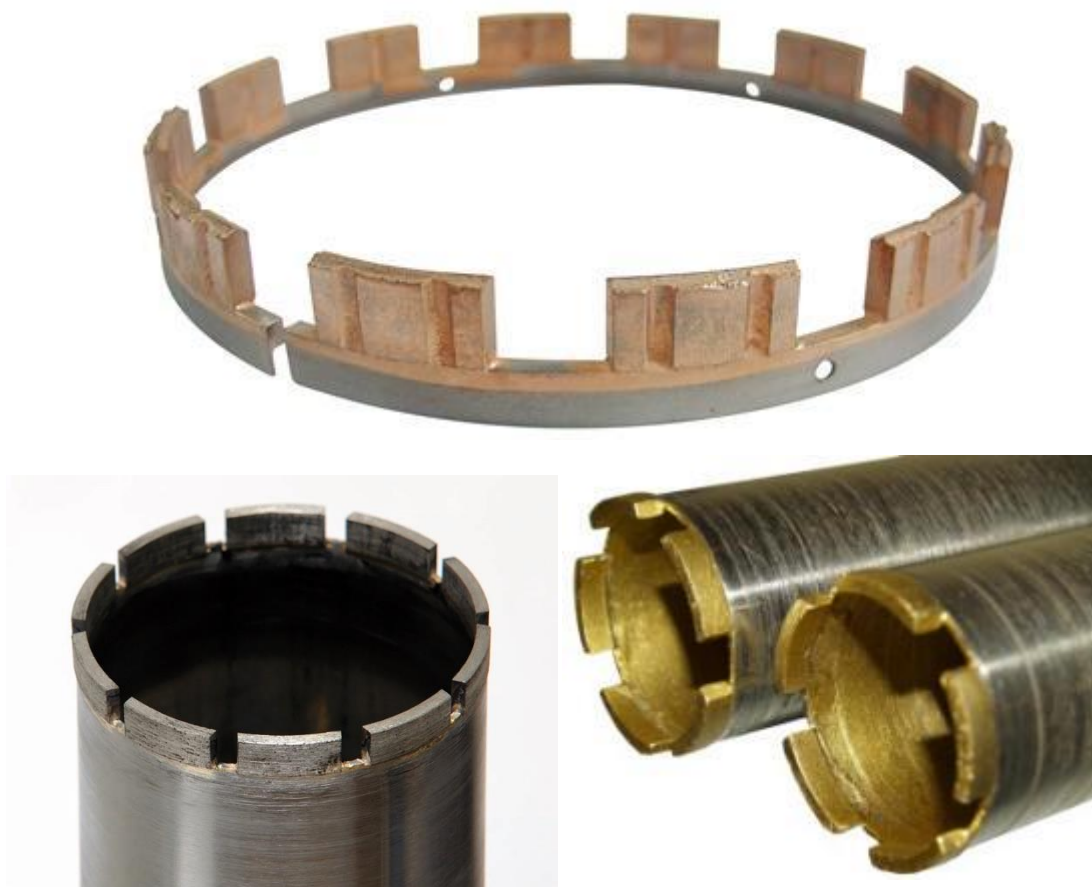
ÚVOD	11
1 ROZBOR ZADANIA	12
1.1 Vstupné podmienky	12
1.1.1 Rezné doštičky	12
1.1.2 Nosná trubka	13
1.2 Alternatívne spôsoby upnutia rezných elementov	13
2 LASEROVÉ TECHNOLOGIE	15
2.1 Fyzikálna charakteristika laseru	15
2.2 Princíp laseru	15
2.2.1 Charakteristiky laserového lúča	16
2.2.2 Typy lúčov	16
2.2.3 Zaoistrovanie lúča	17
2.3 Priemyslové aplikácie laseru	17
3 LASEROVÉ ZVÁRANIE	19
3.1 Metódy laserového zvarovania	19
3.2 Laserové zariadenia	20
3.2.1 Kvapalinové lasery	20
3.2.2 Pevno látkové lasery	21
3.2.3 Polovodičové (diódové) lasery	22
3.2.4 Plynové lasery	23
3.3 Zváranie a ovplyvnené oblasti	25
3.3.1 Materiálová zvariteľnosť	25
3.3.2 Interakcia lúča s materiálom	26
3.3.3 Tvorba zvarového spoja	27
3.3.4 Remote welding	28
3.3.5 Parametre laserového zvarovania	29
3.3.6 Príprava zvarového spoja	29
3.3.7 Tepelne ovplyvnená oblasť	30
3.4 Kvalita zvarového spoja	31
3.4.1 Závady zvarových spojov	31
3.5 Kontrola zvarových spojov	32
3.5.1 Nedeštruktívne skúšky	32
3.5.2 Deštruktívne skúšky	33
3.6 Bezpečnosť pri práci s lasermi	34
3.6.1 Ochrana pri práci	35
4 NÁVRH RIEŠENIA	36
4.1 Voľba laserového zariadenia	36
4.1.1 Zvárací stroj	37
4.2 Zvarové podmienky vzorku 1	38
4.2.1 Príprava zvarového spoja	38

FSI VUT	DIPLOMOVÁ PRÁCA	List 10
---------	-----------------	---------

4.2.2	Realizácia zvaracieho procesu	39
4.2.3	Vizuálne vyhodnotenie procesu	40
4.2.4	Výpočet vneseného tepla	43
4.3	Prípravok.....	43
4.4	Metalografický výbrus	45
4.4.1	EDX analýza	46
4.4.2	Makroštruktúra a mikroštruktúra materiálu	48
4.4.3	Mikrotvrdosť	52
4.5	Vyhodnotenie kvality zvaru	54
4.6	Zvarové podmienky vzorku 2	54
5	TECHNICKO EKONOMICKÉ ZHODNOTENIE.....	56
	ZÁVERY	58
	Zoznam použitých zdrojov	
	zoznam použitých skratiek a symbolov	
	Zoznam obrázkov a tabuliek	
	PRÍLOHY	

ÚVOD [1] [10] [17] [21]

Technológia vŕtania je jednou z najstarších a najpoužívanějších technológií vo všetkých oblastiach, pri práci s drevom, kameňom, kovmi a ostatnými materiálmi. Vytvára priechodné i nepriechodné diery. V stavebníctve sa používa najmä pri renováciách a dokončovacích prácach. Využíva sa na vytváranie kruhových dier rôznych priemerov z nich každý vyžaduje rozličné typy nástroja na ich vytvorenie. Pre vŕtanie malých dier sa používajú skrutkovité vŕtáky, no pokiaľ je potreba vytvoriť dieru väčších priemerov s ohľadom na ekonomiku jej vytvorenia, používame jadrové vŕtanie. V minulosti bolo používané najmä v geológii na skúmanie geologických vrstiev, s nástupom moderných technológií jadrové vŕtanie našlo svoje miesto aj v stavebníctve. Nástroj na vytvorenie dier je jadrový vŕták, ktorý za pomoci vŕtacích korúnok umiestnenými do kruhu po obvode nosnej časti vytvára kruhovú dieru, kde stred zostáva neporušený. Na vytvorenie tohto typu diery nie je potrebné taký výkon a príkon stroja ako u klasickej plnej diery. Ukážky rôznych typov jadrových vŕtákov sú na obrázku 1. Počet korúnok je závislý od priemeru vŕtáku. Materiály korúnok sú monolitné alebo používajú rezné doštičky. Materiály rezných doštičiek sú rôzne od diamantu po spekaný karbid. Spoj medzi doštičkami a vŕtákom musí vykazovať vysokú pevnosť, odolávať vysokému zaťaženiu, teplote a treniu.



Obr.1 [10] [20] [21]

1 ROZBOR ZADANIA

Mojou úlohou je vytvoriť optimálne podmienky pre spojenie rezných doštičiek na nosnú trubku jadrového vrtáku. Jadrový vrták je používaný stavebnou firmou na vrtanie dier do železobetónu. K dispozícii mám dve nosné trubky o priemeroch 110mm a 150mm, a 20ks rezných doštičiek.

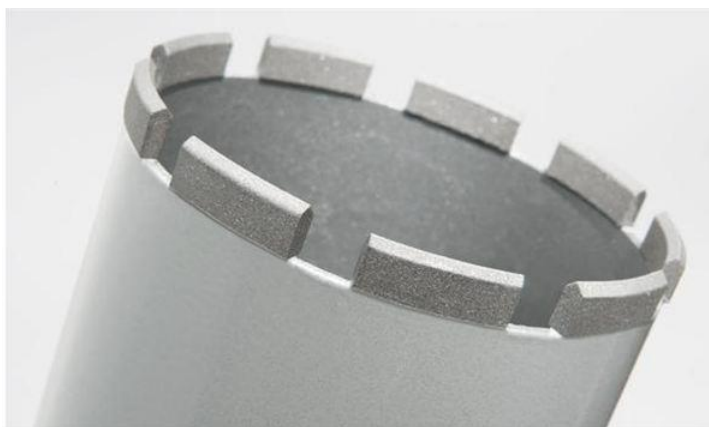
1.1 Vstupné podmienky[1] [22]

Požiadavkou je dostatočne pevný spoj medzi nosnou trubkou a reznou doštičkou.

Jadrové vrtanie sa používa pre vytváranie priechodzích dier priemeru 14 - 600mm. Pri tomto type vrtania, diera nie je vytváraná v celej svojej ploche, ale iba po svojom obvode, uprostred ktorého vzniká jadro, ktoré je zároveň odpad. V tomto odpade je možné vidieť štruktúru materiálu, cez ktoré bol vrt vedený. Tento druh vrtania nepotrebuje tak veľký výkon a príkon stroja ako pri vrtaní v celom priemere (ploche).

Celý proces sa odohráva v jednej operácii. Tento typ vrtania sa používa hlavne pri geologických prieskumoch, pre určovanie zloženia a vlastností hornín a v stavebníctve najmä pri demolácií a rekonštrukcii stavieb (jadro v tomto prípade slúži ako vzorka pre skúmanie stavu budovy), na vytváranie kruhových dier do rôznych materiálov (betón, železobetón, tehla, kameň).

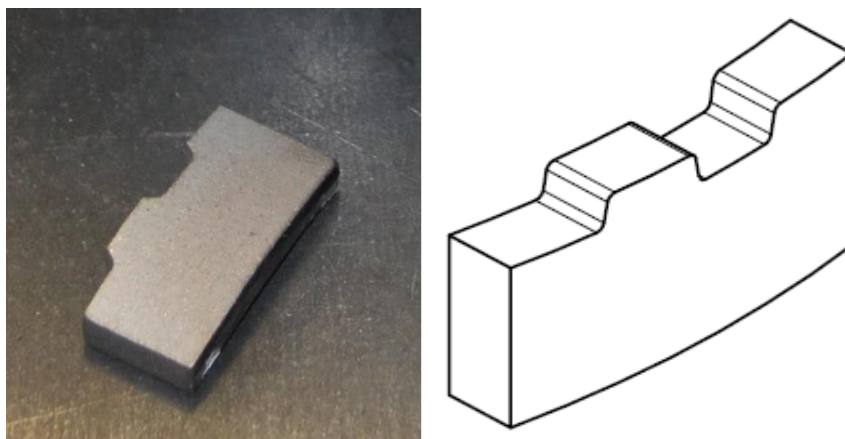
Existujú dva typy vrtákov, monolitné kde je rezná časť aj nosná trubka z jedného materiálu. Druhým typom sú vrtáky s vymeniteľnými reznými doštičkami. V mojom prípade je nosná trubka vrtáku z ocele a na ňu sú pripevnené rezné doštičky. Výhodou použitia jadrového vrtania oproti ostatným metódam vyrábania dier väčších priemerov je zhruba o 20% vyššia rýchlosť vrtania, nižšia hlučnosť a vysoká presnosť vrtania. Ukážka jadrového vrtáku je na obrázku 2.



Obr.2 [22]

1.1.1 Rezné doštičky [1]

Rezné doštičky sú normalizované, ich vyžitie je ekonomickejšie ako výroba monolitných rezných nástrojov. Existuje ich množstvo typov, tvarov, veľkostí a spôsobov upnutia. Pre moje zadanie som mal reznú doštičku zobrazenú na obr.3. Výkres s rozmermi je v prílohe 1. Mojou úlohou bolo vytvorenie pevného spojenia medzi reznou doštičkou a telesom vrtáku. Materiál reznej doštičky nebol zadáný, nie je známa nosná matrica. Rezné prvky sú syntetické diamanty



Obr. 3

1.1.2 Nosná trubka [1] [7]

Nosná trubka na ktorú budem pripevňovať rezné doštičky je z materiálu ČSN 11373, (S235JRG1). Je to oceľ pre výrobu bezošvých trubiek. Má zaručenú zvariteľnosť. Má široké spektrum použitia a dobré mechanické vlastnosti. Pre pokus mám dva rôzne priemery trubky, z ktorej na jednej budem testovať parametre upevnenia, na druhú budú rezné doštičky navarené po vyhodnotení podľa najlepších zvaracích podmienok



Obr. 4 [23]

1.2 Alternatívne spôsoby upnutia rezných elementov [1] [38] [45]

Mojou úlohou je zvoliť optimálny spôsob upínania rezných doštičiek. Ich najčastejšie spôsoby sú nasledujúce.

Častým typom upínania sú mechanicky upínané rezné doštičky. Vrtáky s týmto typom upnutia nevykazujú rovnakú presnosť ako vrtáky monolitné skrutkovité. Ich použitie má však vyššiu pracovnú produktivitu. Tieto typy vrtákov sú vhodné pre plné diery rovnako ako pre jadrové vŕtanie. Počet doštičiek je závislý od priemeru vrtáku. Pre moje zadanie je tento spôsob upínania nevhodný, pretože mechanicky upínané doštičky sa používajú na krátke vrtáky. Príklad vrtáku s vymeniteľnou reznou doštičkou je vidieť na obrázku 5.



Obr. 5 [1]

Ďalším spôsobom spájania reznej doštičky a nosnej trubky je spájkovanie. Spájkovať je možné len spekané karbidy a reznú keramiku. Najväčší problém pri spájkovaní tohto typu rezných doštičiek je vyrovnanie namáhania teplom v spoji, pretože každý zo spájkovaných materiálov má inú tepelnú vodivosť. Pre tento druh spoja sa používajú mo-

sadzné a strieborné spájky s obsahom niklu. Na uchytenie doštičiek sa používa tvrdé spájkovanie, ktorého ukážku je možné vidieť na obrázku 6. Metóda spájkovania rezných doštičiek je dnes na ústupe. V minulosti bola využívaná hlavne pri spájkovaní doštičiek na sústružnícke rezné nástroje.



Obr. 6[45]



Obr.7 [38]

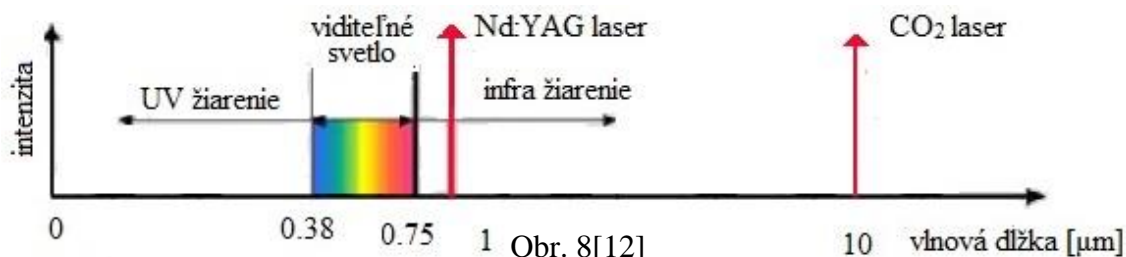
Výhodou laserového zvarania je kvalita zvaru, jeho homogénnosť a čistá prevádzka laseru bez potreby prídavných materiálov, a odpadov. Splodiny vznikajúce počas procesu sa dajú jednoducho a ľahko odsávať. Laserové pracovisko je rýchle, tiché a je jednoducho automatizovateľné. Po zvaraní laserom je len malá tepelne ovplyvnená oblasť, teda deformácie objektu je malá. Úspešne sa používa pri zvaraní ocelí a neželezných kovov, u ktorých sú predpoklady k vzniku trhlin za tepla i za studena. Laser má možnosť deliť svoj zväzok lúčov pomocou zrkadiel a hranolov na rôzne pracovné miesta. Ukážka laserového zvarania je na obrázku 7 .

2 LASEROVÉ TECHNOLOGIE

Ako optimálny spôsob spojenia reznej dosičky a nosného telesa som zvolil laserové privarovanie. V tejto kapitole rozoberiem druhy používaných laserov a ich vlastnosti.

2.1 Fyzikálna charakteristika laseru [4] [12]

Pri laserovom zváraní vzniká laserový lúč, ktorý je vytváraný kvantovým generátorom a zosilňovačom vnútorne usporiadaného sfázovaného optického vlnenia. Zaraďujeme ho do elektromagnetického žiarenia. Od iných druhov žiarenia sa líšia iba vlnovou dĺžkou. Viditeľné svetlo je taktiež vlnenie, v ktorom sa nachádzajú vlny najrôznejších dĺžok a frekvencií. Podľa typu laseru sa ich vlnové dĺžky nachádzajú v širokom spektre. Od spektra mikrovlnného žiarenia cez infračervené a UV žiarenie až po röntgenové lúče. Rozsah vlnových dĺžok pri danom druhu technológie je od stoviek mikrometrov až po jednotky nanometrov. V nasledujúcom obrázku 8 je vidieť príklad vlnových dĺžok jednotlivých druhov laserov v porovnaní s viditeľným spektrom.



Laserové zariadenie je prevodník energie kvality nižšej, (napríklad chemickej svetelnej alebo tepelnej) na energiu kvality vyššej, teda energiu laserového zariadenia. Je to zariadenie ktoré má schopnosť znižovania entropie sústavy, pri ktorom sa využije určitý objem energie. Pri zváraní vzniká lúč s vysokou hustotou energie (až 10^8 W.cm^{-2}). Laser je optický zosilňovač kde je generované elektromagnetické žiarenie, pomocou procesu stimulovaných emisií fotónov.

2.2 Princíp laseru [4] [15] [30]

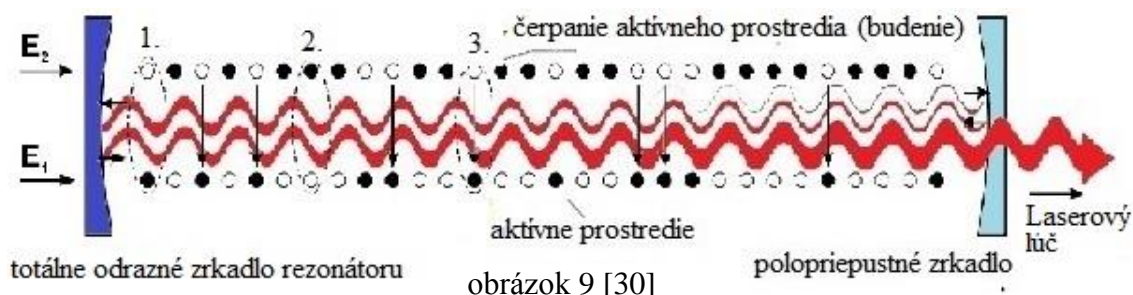
Typov strojov ktoré vytvárajú laserový lúč je mnoho, ich prvky sú :

- laserové aktívne prostredie
- zdroj čerpania
- optický rezonátor

Základom každého laserového zariadenia je aktívne prostredie, kde prebieha proces zosilňovania žiarenia. Na jeho vznik je potrebná excitácia (budenie) a to chemické, elektrické, optické a iné, teda zdroj čerpania. Optický rezonátor je väzbou medzi aktívnym prostredím, za jeho pomoci vznikajú laserové oscilácie.

V aktívnom prostredí laseru, zdroj budiacej energie zaisťuje dostatok kvantových sústav vo vybudenom stave. Jedna z týchto sústav náhodne prejde do nižšieho stavu, čo spôsobí uvoľnenie ďalších sústav. Ak je v aktívnom prostredí dosť sústav v excitovanom stave, optické žiarenie sa bude zosilňovať. Náhodné emisie sa stávajú zanedbateľnými. Generované žiarenie je jednotné, jeho usmernenie zaisťuje aktívne prostredie, ktoré je v tvare valca umiestnené vo vnútri optického rezonátoru. Toto usporiadanie zaisťuje zo-

silňovanie rezonancie fotónov, a po dosiahnutí požadovanej veľkosti zosilnenia je laserový zväzok vyvedený z rezonátoru ako na obrázku 9.



Na obrázku 9 je zobrazené aktívne prostredie s inverzným obsadením hladín. Prostredie je izolované v rezonátore, ktorý tvoria rovinné, alebo sférické zrkadlá umiestnené oproti sebe. Spätná väzba umožní odraz žiarenia späť do aktívneho prostredia a vzniká generátor elektromagnetických kmitov. Ak v aktívnom prostredí prekročí zosilnenie svetla straty, pri jednom priechode medzi zrkadlami, laser emituje žiarenie na takej vlnovej dĺžke, ako aktívne laserové prostredie. Na to, aby lúč mohol opustiť aktívne prostredie rezonátoru, musí byť jedno zo zrkadiel čiastočne priepustné. Jednotlivé kvantové stavy sú na obrázku označené číslami, v základnom (1), a v excitovanom stave (2), stav simulovanej emisie (3).

2.2.1 Charakteristiky laserového lúča [15] [27]

- Energetická charakteristika

Pre kontinuálny laser je to výstupný výkon. Pre pulzový laser je základná charakteristika energia pulzu.

- Monochromatickosť

Vlnové dĺžky sú v úzkom rozpätí. V ideálnom stave by bolo žiarenie zložené iba z fotónov. V reálnom prípade sú v žiarení drobné odchýlky.

- Koherentnosť

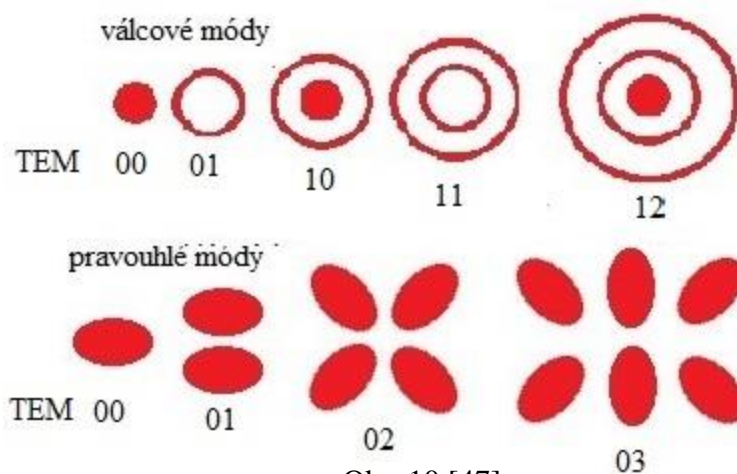
Emitované vlny ktoré pochádzajú z rôznych miest aktívneho prostredia majú pevný fázový vzťah. Jedinečnosť laserového lúča je jeho smerovosť. Tá je daná sfázovaním žiarenia na ploche, ktorá je väčšia ako vlnová dĺžka žiarenia pri výstupe lasera na povrchu polopriepustného zrkadla. Smerovosť (koherentnosť) sa charakterizuje priestorovým uhlom.

2.2.2 Typy lúčov [4][27][47]

V laserových rezonátoroch je možné súčasne vybudit' mnoho typov oscilácií, s rôznymi frekvenciami a amplitúdami. To spôsobuje zníženú spektrálnu čistotu, koherentnosť, a zväčšuje sa divergencia lúča. Ak sa zníži kvalita týchto vlastností, kvalita lasera na výstupe je nižšia. Preto je nutné oscilačné módy nastavovať. Delíme ich na priečne a pozdĺžne.

Pozdĺžne módy sa určujú množstvom uzlov stacionárneho vlnenia, vytvorenej medzi zrkadlami rezonátora v smere optickej osy. Priečne módy sú určené rozložením poľa na povrchu zrkadiel. Módy sa delia podľa súradnicových sústav na pravouhlé a valcové

a sú zobrazené na obr. 10. Módy sa označujú TEM, rád módu má podstatný vplyv na výstupnú kvalitu lúča. Pri použití laseru na zváranie a rezanie je dôležité, aby bol výstupný lúč čo najhustejší, čo sa dosahuje pomocou gaussovho rozloženia energie v lúči.



Obr. 10 [47]

2.2.3 Zaostrovanie lúča [4][40]

Zaostrovanie (fokusovanie) je dôležité nastavenie laserového lúča. Pokiaľ lúč nie je správne zafokusovaný, neposkytuje dosť veľkú hustotu energie na to, aby bola dosiahnutá teplota tavenia materiálu, ktorý je spracovávaný. Nefokusovaný priemer lúča má priemer rádovo v milimetroch, priemer fokusovaného lúča je daný rovnicou 2.1.

$$d = \frac{4 \cdot f \cdot \lambda}{\pi \cdot d_o} \quad (2.1)$$

kde: λ – koeficient tepelnej vodivosti

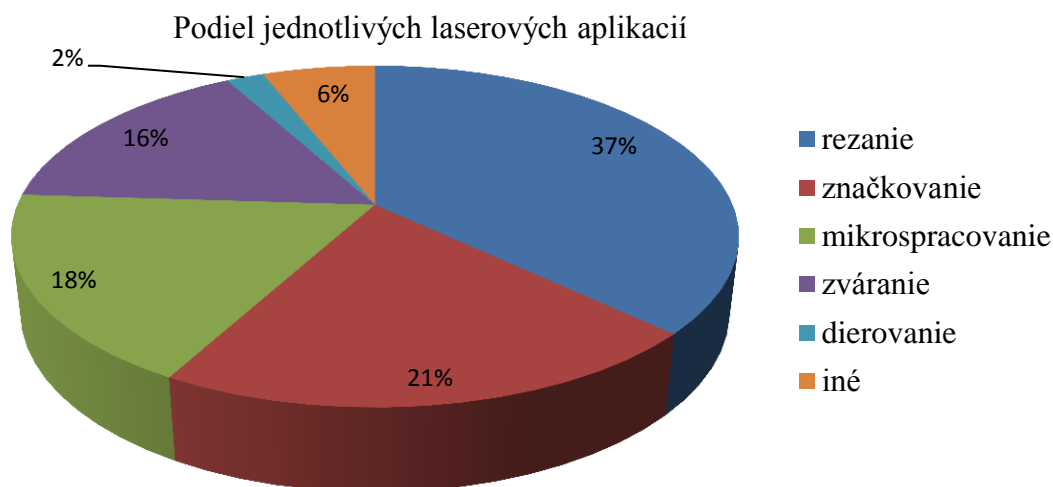
f – ohnisková vzdialenosť šošovky

d_o – pôvodný priemer lúča

Fokusovanie lúča sa prevádza za pomoci optických šošoviek alebo zrkadiel, výber prvkov k ostreniu je závislý na vlnovej dĺžke lúča a na druhu laseru (CO₂ Nd:YAG atd.). Šošovky umožňujú presnejšiu fokusáciu do bodu ako zrkadlá. Pri použití šošoviek sa teda zvýši výkon laseru. Nezaostrený lúč je v priemere niekoľko milimetrov široký, lúč sa zaostruje na desatinu až tisícinu milimetra.

2.3 Priemyslové aplikácie laseru [37] [39] [52]

Laserová technológia je použiteľná v širokom rozsahu oblastí a to nielen v priemysle, ale aj v rade ďalších odborov (medicína, metrológia, komunikácia). Tieto technológie v súčasnosti patria k najprogressívnejším metódam výrobného procesu. V strojárskych oblastiach je to ideálny nástroj pre procesy rezania, značenia, zvárania a tepelného spracovania. Využitie laserových aplikácií je možné vidieť v nasledujúcom obrázku 11. Tento krátky prehľad zahŕňa len tie najzákladnejšie a najpoužívanéjšie metódy.



Obr. 11[39]

- Laserové vŕtanie

Princíp laserového vŕtania je založený na odparovaní materiálu z miesta vŕtania. Je potrebná vysoká hustota výkonu dopadajúci na miesto vŕtania. Materiál sa pri dopade na miesto vŕtania ohreje na teplotu tavenia materiálu a dochádza k čiastočnému odparovaniu. Vytvorí sa dutina, v ktorej sa lúč niekoľkokrát odrazí, čo spôsobí zvýšenie absorpcie a zväčšenie otvoru. Vŕtať je možné kovové a nekovové materiály.

- Laserové rezanie

Výhoda rezania materiálu laserom je veľmi úzky, presný rez s hladkými okrajmi. Je zaručená kolmosť, po odrezaní nie sú nutné ďalšie úpravy hrany. Hrúbka rezanej vrstvy je závislá od výkonu laseru. Pre technológiu rezania sa používajú mnohé technológie: odparovanie, tavné rezanie, laserové tryskanie, studené rezanie a iné. Najpoužívanejší typ rezania je odparovacie, prakticky je to vŕtanie malých dier vedľa seba.

- Laserové spracovanie povrchu

Medzi laserové spracovanie povrchu patrí označovanie povrchov, popisovače sa používajú na výrobných linkách, ako nástroj sa používa diódový laser. Tento druh označovania povrchu poskytuje veľa výhod, je možné popisovať rôzne tvarované súčiastky. Označenie má vysoký kontrast a je možné popisovať rôzne hĺbky.

Pri vyššom výkone sa povrch materiálu natavuje, ak do nataveného povrchu pridávame materiál, hovoríme o laserovom legovaní. Vzniká pri tom homogénna vrstva o hrúbke 1µm až 2mm.

- Laserové zváranie

Zváranie laserom nahrádza oblúkové metódy zvárania, hlavne vo veľkosériových výrobných. Používajú sa od zvárania dielov na tranzistory až po zváranie karosérii automobilov. Tento typ zvárania umožňuje rýchly ohrev materiálu a zváranie materiálov s vysokou tepelnou vodivosťou (Cu, Ag, Al). Taktiež aj na materiály s vysokou teplotou tavenia (W, Mo, Ta, Zr a iné). Prehľad typov zariadení a ich funkciu preberiem v nasledujúcej kapitole.

3 LASEROVÉ ZVÁRANIE

V praxi sa tento druh zvárania využíva stále častejšie. Zváranie je veľmi náročný proces. Okrem tvaru musia spoje spĺňať celistvosť. Proces je ľahko automatizovateľný, bezkontaktný a flexibilný. Má svoje výhody i nevýhody.

Jedna z výhod je malá plocha zvaru, tým pádom malá tepelne ovplyvnená oblasť, hlboký prievar materiálu a aj pri vysokej postupovej rýchlosti zvárania je vizuálna stránka zvaru pohľadovo dobrá a nevyžaduje žiadnu ďalšiu úpravu povrchu. Ich energetický vstup môže byť ľahko riadený. Laserom je možné zvárať materiály s rozličnými teplotami tavenia. Prevádzka takéhoto zariadenia je čistá a tichá. Je možné zvárať aj na miestach, kde by to inou technológiou nebolo možné. Nedochádza pri ňom k miešaniu materiálov elektród a základného materiálu. Je možné zvárať aj bez prístupu vzduchu.

Nevýhodou je náročná príprava procesu zvárania vzhľadom na opakovanú rozmerovú toleranciu výroby. Tiež je nutné, ako aj pri iných typoch zvárania, chrániť si zrak pred nebezpečnými lúčmi. Ďalšou nevýhodou je obstarávacía cena laserového zariadenia. Jej výška závisí od použitej technológie. Pre obsluhu laserového zariadenia je nutná vysoko kvalifikovaná osoba.

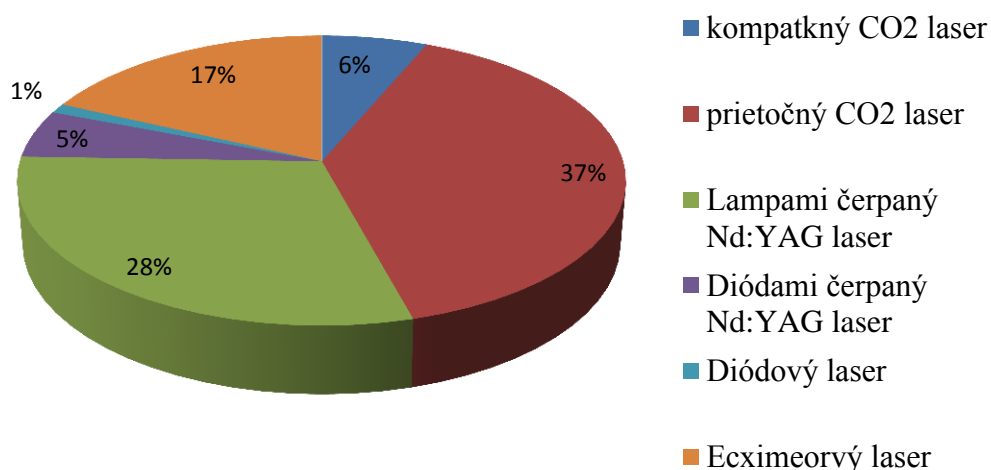
3.1 Metódy laserového zvárania [39]

Existuje mnoho typov zdrojov laserového lúča pre zváranie. Delíme ich podľa mnohých kritérií ktoré sú rozdelené v nasledujúcom prehľade. Prehľad typov laserov používaných na našom trhu je na obrázku 12.

Základným rozdelením laserov je podľa druhu aktívneho prostredia:

- Pevno látkové
- Polovodičové
- Plynové
- Kvapalinové
- Plazmové

Typy laserov používané na trhu



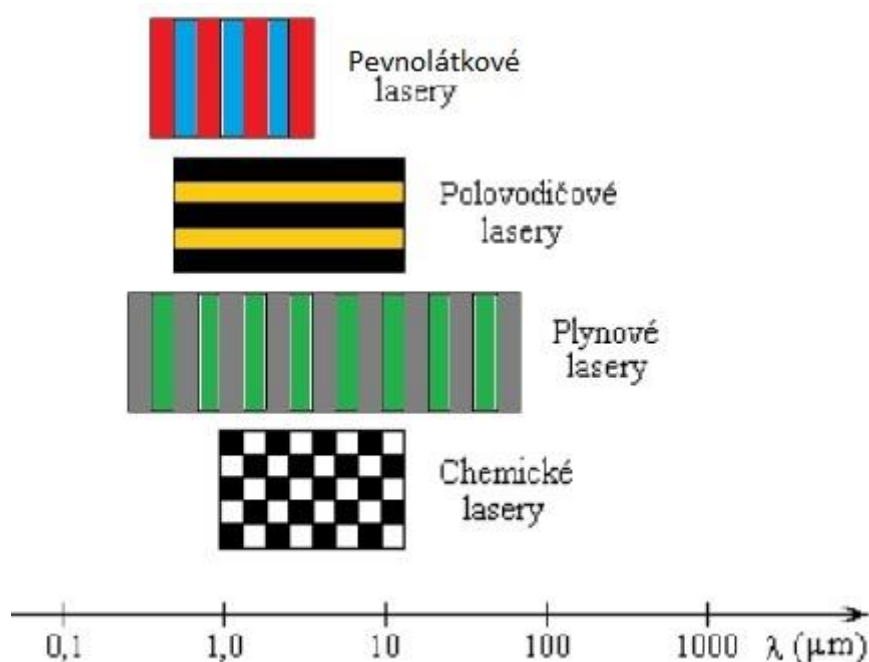
Obr.12[39]

Najčastejšími požiadavkami na laserové zariadenie sú:

- Energetický výkon od 100W až po desiatky kW
- Cenová dostupnosť
- Dlhodobá prevádzková spoľahlivosť

3.2 Laserové zariadenia [37]

Priemysel v súčasnej dobe využíva veľa druhov laserov. Všetky druhy laserov pracujú na základe stimulovanej emisie, ich konštrukcie a vlastnosti sa výrazne odlišujú. Na obrázku 13 je vidieť prehľad vlnových dĺžok jednotlivých typov laseru podľa aktívneho prostredia.



Obr. 13 [37]

3.2.1 Kvapalinové lasery[4]

Ich aktívne prostredie má veľkú homogenitu, čo umožňuje získať veľkú hustotu intenzity žiarenia. Aktívna látka je dobre chladená pomocou cirkulácie kvapaliny (ktorá má veľkú hustotu) v optickom rezonátore a vhodnom chladiči. Pre budenie kvapalinových laserov sa používa optické žiarenie. Tento typ prostredia združuje výhody pevných a plynových aktívnych prostredí. Kvapalinové lasery delíme na dve základné skupiny:

- Lasery s anorganickými aktívnymi látkami
- Lasery s organickými aktívnymi látkami

Najväčšou výhodou tohto typu laseru je možnosť preladovania vlnových dĺžok. Táto vlastnosť umožňuje využívanie laseru v spektrometrii. Najmodernejšie použitie, je aplikácia v medicíne a to na ničenie rakovinotvorných buniek. Cena tohto typu laseru je v porovnaní nižšia. Nevýhodou je malá fotochemická stálosť.

3.2.2 Pevno látkové lasery [37][39][41][52]

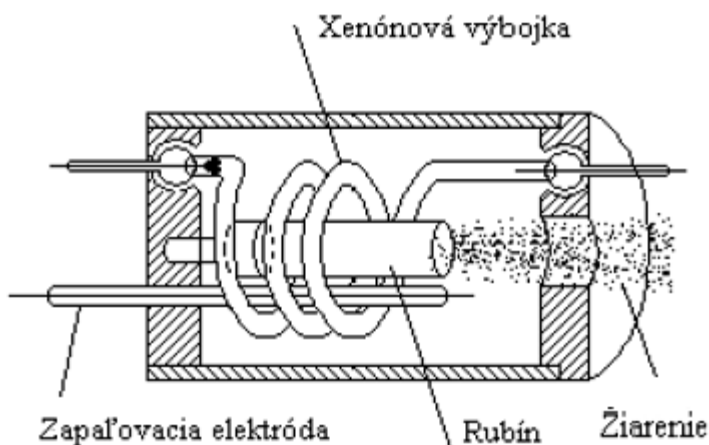
Všeobecne by bolo možné povedať, že do tejto skupiny patria všetky typy laserov. Aktívne prostredie tvoria monokryštalické, alebo amorfne látky s prímiesou aktivačných prvkov. Kvantá energie sú vyžarované, alebo absorbované pri zmene energetických stavov atómov. Základné časti zariadení sú: rezonátor s aktívnou látkou, zdroj čerpania, optický čerpací systém. Pevno látkové lasery dokážu pracovať za rôznych prevádzkových podmienok a ich údržba je nenáročná.

Existuje veľa typov pevno látkových laserov, najpoužívanejšie sú : Nd:YAG, Nd:glass, Nd:YVO₄, Nd:YLF, Nd:KGW, Er:YAG, Yb:YAG, Ti:Al₂O₃

- Rubínový laser

Aktívnou látkou je monokryštál syntetického rubínu (kryštál Al₂O₃, zaafir bielej farby). Rubíny používané v laseroch sú v tvare tyčiniek s prierezom v tvare kruhu. Pracujú v trojstupňovom režime. Čerpanie aktívneho prostredia je pomocou xenónovej, alebo ortuťovej výbojky. Obvyklá hustota výstupnej energie žiarenia v jednom impulze je 1 až 10 J (v špičke až 150J), s účinnosťou lasera 0,75%. Schematické zobrazenie laseru je na obrázku 14.

Nevýhodou tohto lasera je obmedzená rýchlosť opakovania pulzov z a sekundu. Je nutné intenzívne chladenie, inak nie je možné použiť kontinuálny režim. Farba žiarenia je jasne červená. Dnes je táto technológia na ústupe a je nahradená Nd:YAG a Yb:YAG.



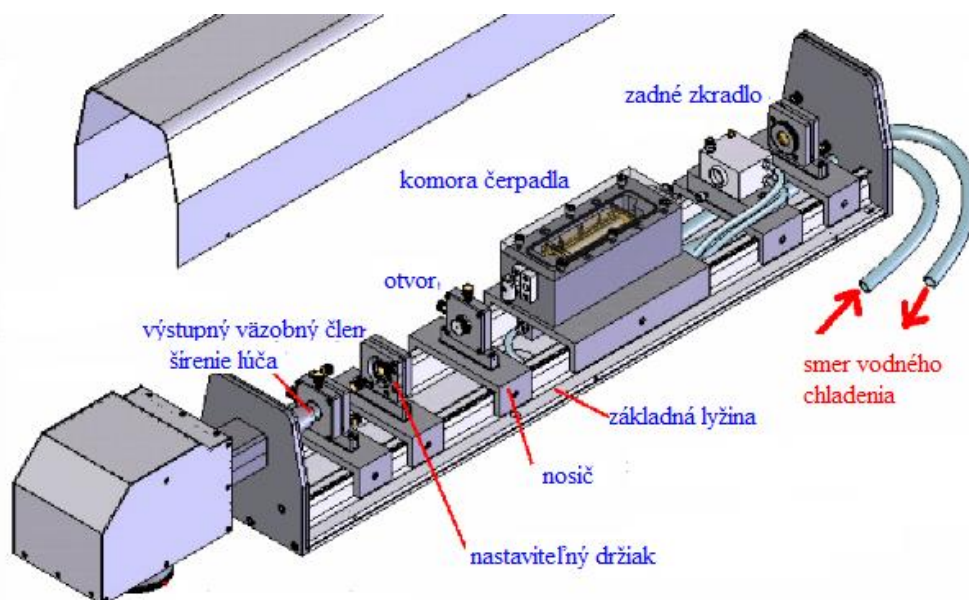
Obr. 14[41]

- Nd:YAG laser

Je to typ pri ktorom aktívne prostredie tvorí neodým dopovaný ytrium-alumínium-granátom. Žiarenie je neviditeľné - infračervené. Na svoju prevádzku potrebujú relatívne malú energiu na čerpanie. Používajú sa v pulznom aj kontinuálnom režime. Pracujú podľa štvorúrovňového modelu. Podľa zdroja budenia sa rozdeľujú na lasery budené výbojkami (LPSS- lamp pumped solid state), tento druh ma nižšiu účinnosť premeny elektrickej energie na svetelnú, jej veľká časť sa premieňa na teplo. Druhým typom budenia sú lasery budené diódami (DPSS- diode pumped solid state), majú vyššiu kvalitu zväzku a účinnosť. Schematické zobrazenie laseru je na obrázku 15.

Jeho výhodou je vysoká energia pulzu (dobré mechanické aj optické vlastnosti), pri zváraní sa používa na vytváranie hlbokého zvaru a relatívne malej tepelne ovplyvnenej oblasti. Nevýhodou sú veľké nároky na chladenie, nízka účinnosť a krátka účinnosť výbojky (LPSS). Používa sa pre laserové vŕtanie, rezanie, zváranie, žihanie a značkovanie, je to historicky najstarší typ používaný v priemysle.

Rozdiel medzi Nd:YAG a Yb:YAG je v použití prvku v aktívnom prostredí – Nd používa látku neodým, Yb používa látku Ytterbium. Oba tieto typy môžu byť diskové i vláknové.



Obr. 15 [39]

- Vláknový laser

Vláknový laser je najnovší typ laseru, aktívne prostredie tvorí optické vlákno s ytterbiem, budenie je z laserových diód cez spojku vedené do aktívneho vlákna. Pri tomto type laseru sa nepoužívajú zrkadlá, ale Braggovské mriežky. Sú to štruktúry tvorené priamo vo vlákne. Na konci vlákna sa nachádza optický kolimátor, ktorý vyvezuje žiarenie. Vláknové lasery môžu byť použité ako kontinuálne, pulzné, alebo kvázipulzné. Schematické zobrazenie laseru je na obrázku 16.

Používa sa pre značenie, gravírovanie, rezanie a zváranie. Výhodou celého zariadenia je jeho jednoduchosť (zariadenie prakticky tvorí iba optické vlákno), vysoká účinnosť zariadenia (až 35%) a veľká životnosť (až 100000 hodín). Zariadenie je tvorené modulmi, ktoré postupným navyšovaním môžu udeliť výkon až 80kW. Kvalita lúča je veľmi vysoká.



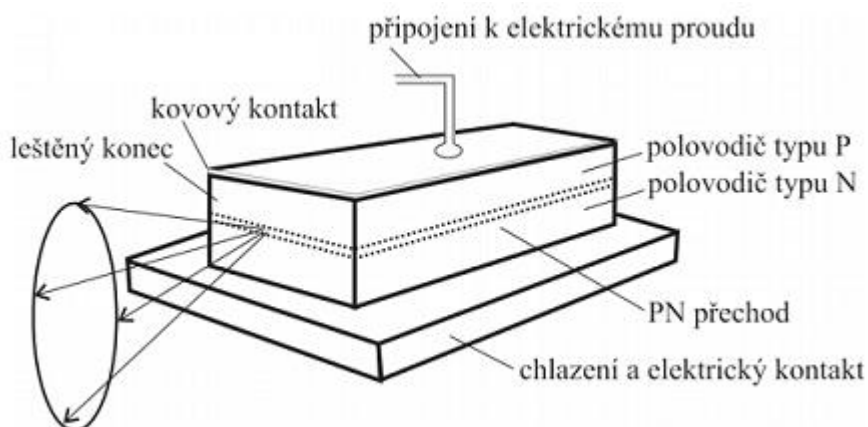
Obr. 16[52]

3.2.3 Polovodičové (diódové) lasery [38] [39] [52]

Tento druh laseru je dnes najrozšírenejší v priemyselnej praxi, od ostatných laserov sa líšia tým, že nepracujú s prechodom elektrónov medzi diskretnými hladinami. Zákla-

dom konštrukcie sú laserové diódy s malými rozmermi. Aktívne prostredie je polovodič čerpaný elektrickým prúdom. Vystupujúci zväzok má veľkú divergenciu, rôznu v smeroch osy X a Y, a nižšiu kvalitu zväzku v porovnaní s ostatnými typy. Zariadenie môže pracovať v kontinuálnom aj pulznom režime. Žiarenie sa generuje priamo v polovodiči. Výkon zariadení je až 15kW. Schematické zobrazenie je na obrázku 17.

Diódové lasery sa najčastejšie používajú k zváraní, pájkovaniu alebo iným povrchovým aplikáciám, uplatňujú sa aj vo výpočtovej technike. Výhodou je nízka hmotnosť zariadenia a vysoká účinnosť, ktorú je možné modulovať pomocou budiaceho elektrického prúdu. Nevýhodou je väčšia rozbiehavosť a citlivosť zariadenia na zmenu teploty.



Obr. 17 [25]

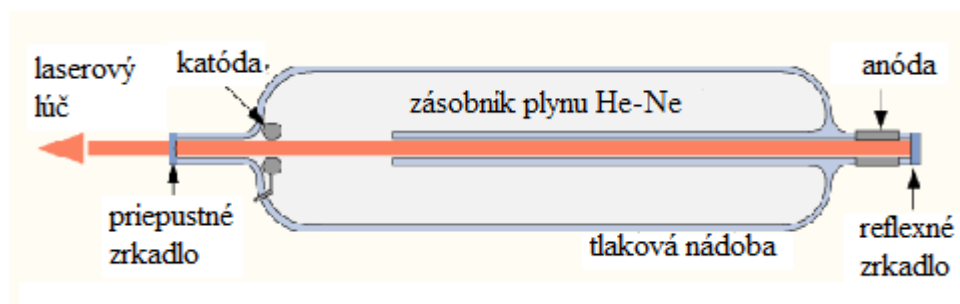
3.2.4 Plynové lasery[2] [4] [40] [39]

Aktívne prostredie sa nachádza v plynovej fáze. Používa sa čistý plyn alebo zmes plynov a pár. Tento druh prostredia je homogénnejší ako pevné prostredie. Aktívne prostredie má nižšiu hustotu aktívnych častíc, z čoho plynie menšia hustota výkonu. V tomto prostredí sa ľahko odvádza teplo. Aby bol dosiahnutý veľký výkon, rozmery aktívneho prostredia musia byť väčšie. Ich žiarenie môže byť emitované v širokých pásmach vlnových dĺžok od UV po submilimetrové pásmo. Plynové lasery sú vhodným zdrojom pre spojitú (kontinuálnu) laserovú žiaru. Výkon plynových laserov je od 10^{-1} do 10^3 W. Vlnová dĺžka prechádza spektrom od ultrafialovej po infračervenú.

Najpoužívanejšie druhy plynových laserov sú: atómové, iónové, molekulové a dusíkové.

- Atómové

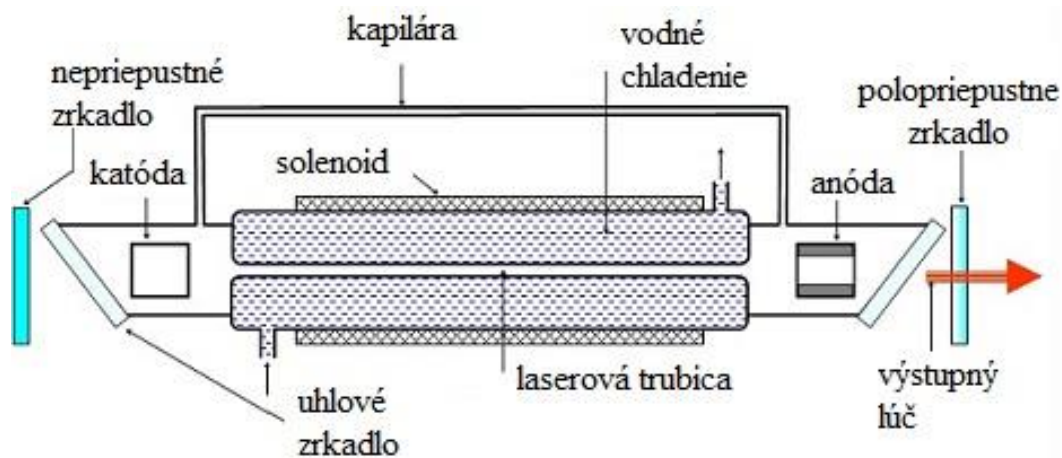
Najpoužívanejším druhom je Hélium – Neónový laser. Pomer plynu He:Ne = 10:1. Hélium čerpá energiu zrážkami elektrónov vytvorených vo výbojom plyne. Používa sa pri nízko výkonových aplikáciách (výkon od 1mW až 60mW), hlavne v metrológii na meranie vzdialeností, alebo geodézii pri vytyčovaní trás. Schematické zobrazenie hélia - neónového lasera je na obrázku 18. Tento druh zariadenia je ľahko prenosný, je to jednoduchý zdroj kontinuálneho laserového žiarenia vo viditeľnom spektre. Ďalšími druhmi plynových laserov sú lasery inertných plynov (Ne, Ar, Kr a Xe).



Obr. 18[2]

- Iontové (Ar, Kr, He-Cd, He-Se)

Argónový laser žiari v zelenomodrej oblasti svetla ($\lambda = 450$ až 530 nm, viditeľná oblasť), budiacim mechanizmom sú zrážky, pracovný plyn je Argón. Pracovné prostredie je zvyčajne tvorené z BeO keramiky, ktorá dobre znáša veľkú prúdovú hustotu. Nevýhodou je jej toxicita. Na ionizovanie Ar je nutná veľká prúdová hustota. Pri výkonnejších typoch sa používa umiestnenie kapiláry do magnetického poľa solenoidu. Je to kontinuálny druh lasera, schematické zobrazenie je na obrázku 19. Hrúbka kapiláry má vplyv na počet vlnových dĺžok, čím je užší, tým je ich menej a naopak. Používajú sa pre holografiiu, spektrografiu a obrábanie.



Obr. 19[52]

- Molekulové

Najpoužívanejší molekulový laser je CO_2 . Jeho výstupný výkon sa pohybuje od 100 do 1000W. Žiarenie stimuluje pri prechode medzi hladinami molekúl CO_2 . Pri jeho prevádzke dochádza k rozkladu molekúl CO_2 a N_2 , čo spôsobuje zmenu aktívneho prostredia. Aktívny plyn prostredím preteká s pomalým, alebo s rýchlym prechodom. Na svoj prechod používajú vibračno-rotáčne molekulové prechody.

Molekulový CO_2 laser sa používa pri rezaní, zvaraní, žíhaní a najmä v automobilovom priemysle. Nevýhodou je vlnová dĺžka žiarenia v infračervenej oblasti ($\lambda = 10,6 \mu\text{m}$), čo zvyšuje reflexiu žiarenia od povrchu materiálu. Schematický obrázok rôznych konštrukcií molekulových laserov je na obrázku 20. Konštrukcia CO_2 sa delí podľa smeru čerpania a zdroje plynovej zmesi na tri základné:

- Pozdĺžne prúdenie

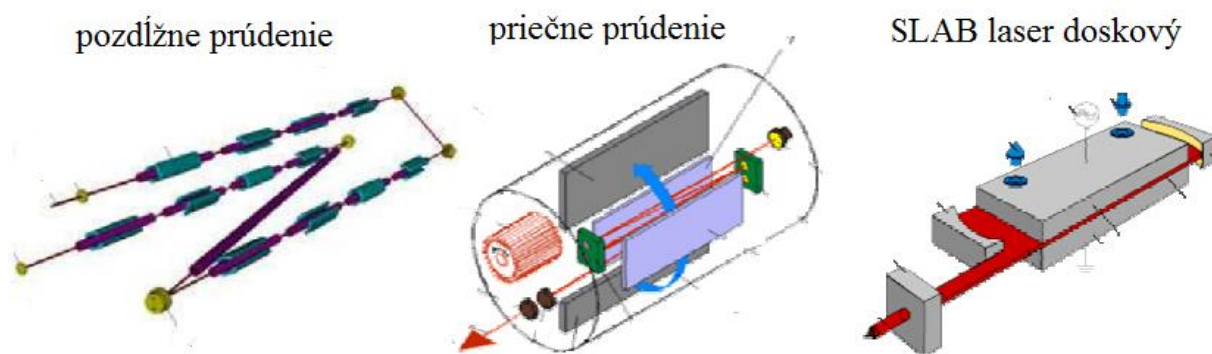
Vhodné pre rezanie, elektrický výboj prebieha v ose trubice, plyn prúdi súbežne s osou trubice vysokou rýchlosťou. Výkony sa pohybujú od 10W až po 20kW. Zmes je kontinuálne dopĺňovaná z externého zásobníku.

- Pričné prúdenie

Plynová zmes prúdi malou rýchlosťou kolmo k ose rezonátoru, budená vysokofrekvenčnými prúdmi. Kvalita zväzku je nižšia, je vhodná k zváraní, povlakovaniu a kaleniu materiálov. Výhoda je nízka spotreba plynu.

- SLAB laser – doskový

Je to najnovší typ CO₂ laseru s výkonom 1- 2,5kW, nie je potrebný vonkajší zdroj plynovej zmesi. Zvyčajne majú zásobník o objeme desať litrov, ktorý vy- stačí na rok prevádzky. Laserový zdroj má vodou chladené vysokofrekvenčné elektródy. Nestabilný rezonátor je tvorený dvomi valcovými zrkadlami a generovaný zväzok má obdĺžnikový prierez. Zväzok je transformovaný na ro- tačne symetrický zväzok s vysokou kvalitou. Najväčšou výhodou je absencia pohyblivých častí, čo zvyšuje spoľahlivosť, nízka spotreba plynu a energie.



obr. 20 [39]

3.3 Zváranie a ovplyvnené oblasti [26]

Termín zváranie je definovaný ako nerozoberateľný spoj dvoch materiálov. Využitie laserového lúča na zváranie je veľmi náročné. Požiadavky na zvarový spoj sú:

- Celistvosť spojov
- Minimálna deformácia materiálu
- Dobré mechanické vlastnosti
- Dobré fyzicko-metalurgické vlastnosti
- Bezkontaktný proces
- Úzky a hlboký závar

3.3.1 Materiálová zvariteľnosť [26]

Laserová technológia umožňuje zväzať široké spektrum materiálov (železné i neželezné kovy, plasty) rôznych chemických zložení s rôznymi stupňami premiesenia. Pri dopade lúča na zváraný materiál vznikajú mnohé procesy, ktoré majú priamy vplyv na kvalitu zvarov. Procesy prebiehajúce pri dopade lúča na povrch sa nazývajú ohrev, absorpcia

žiarenia, tavenie a vyparovanie materiálu. Orientačný prehľad zvariteľnosti rôznych typov materiálov je zobrazený v tabuľke 1.

Tabuľka 1 zvariteľnosti materiálov [26]

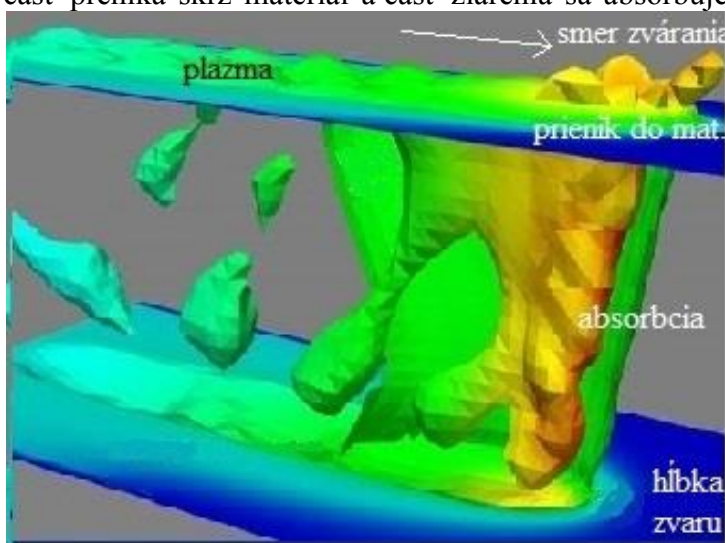
	W	Ta	Mo	Cr	Co	Ti	Be	Fe	Pt	Ni	Pd	Cu	Au	Ag	Mg	Al	Zn	Cd	Pb
Sn	X	X	X	X	X	X	X	X	○	X	○	X	○	○	X	X	X	X	○
Pb	X		X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Cd				X	X	X		X	○	○	○	X	○			X	X		
Zn	X		X	X	○	X	X	○	X	○	○		○		X	○			
Al	X	X	X	X	○	○	X	○	X	○	X	○	○	○	○				
Mg	X		X	X	X	X	X		X	X	X	○	○	○					
Ag	X	X	X	X	X	○	X	X	○	X									
Au			X	○	X	○	○	○											
Cu	X	X	X	X	○	○	○	○											
Pd	○					○	○												
Ni	○					○	○												
Pt		○				○	X												
Fe	○	○				○	○												
Be	X	X	X	X	○	X													
Ti	○				○														
Co	○	X	○																
Cr		X																	
Mo																			
Ta																			

legenda

	Výborná
	Dobrá
○	Čiastočná
X	Zlá

3.3.2 Interakcia lúča s materiálom [51] [53]

Časť žiarenia sa vždy odrazí, časť preniká skrz materiál a časť žiarenia sa absorbuje. Absorpcia energie spôsobí ohriatie materiálu. Rýchlosť ohrievania a šírka tepelne ovplyvnenej oblasti je závislá na veľkosti vniknutej energie, priemere sfokusovaného lúča a typu použitého zariadenia. Je taktiež dôležitá odrazivosť materiálu (farba a povrchová úprava). Kov sa natavuje a vzniká plazma ktorá postupne tuhne a vzniká zvarový spoj. Príklad vzniku a chladnutia zvarového spoja je možné vidieť na obrázku 21.

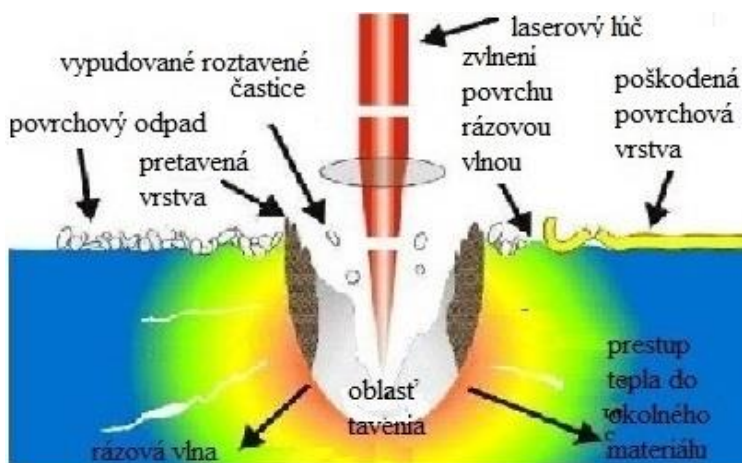


Obr. 21 [51]

3.3.3 Tvorba zvarového spoja [2][8] [17]

Zváranie laserom zabezpečuje v krátkom čase, nerozoberateľné spojenie dvoch materiálov. V praxi sa používa výhradne zafokusaný lúč o veľkej hustote. Energiu je možné presne zaostriť, za podpory optického systému na veľmi malú plochu povrchu materiálu za krátku dobu. Tepelné procesy prebiehajú v cykloch ohreву a chladenia, čo znižuje možnosť vzniku trhlín. Pevnosť základného materiálu

je zvyčajne nižšia ako pevnosť zvarového spoja. Po dopadnutí zaoštrého zväzku laserového lúča na malú plochu sa časť žiarenia odrazí a časť materiál absorbuje. Hustota energie dopadajúcej na povrch zvaranej súčiastky je veľká a odvod tepla je pomalý, materiál dosahuje za krátku dobu teplotu tavenia. Na obr. 22 [8] je zobrazený stav materiálu po vniknutí zvarového lúča.



Obr. 22

Natavovanie a vyparovanie kovu na povrchu materiálu vedie k vzniku tlakovej vlny v roztavenom materiáli, ktorá ovplyvňuje tvar natavenej oblasti. Parametre zvarovania výrazne ovplyvňujú kvalitu zvaru. Dôležitá vlastnosť je pomer hĺbky a šírky zvarového spoja. Pri laserovom zvarovaní teda rozoznávame dva druhy režimov:

- Režim kondukčný (impulzívny)
- Režim kontinuálny (hlboký)

Kondukčné zvarovanie je dynamický tepelný proces. Zvarový spoj má väčšiu šírku ako hĺbku (zvyčajne niekoľko desatiny milimetra až milimeter). Spoj už netreba obrábať. Energia sa dostáva do spoja len kondukciou tepla pomocou absorpčnej látky, ktorá je nanosená na rozhraní zvarových súčiastí. Ak teplo nie je dostatočne odvádzané od zvarového spoja, zvýšená teplota spôsobuje väčšiu hĺbku zvaru a odparovanie kovu.

Používa sa v prípadoch, keď je hĺbka zvaru obmedzená, ideálne na spájanie tenkostenných súčiastok pri elektrotechnických aplikáciách. Pri správne zvolených podmienkach nemusí byť zvar z pohľadovej strany vidieť. Schematický obrázok 23 vľavo.

Kontinuálny režim vyžaduje väčší výkon stroja (doporučuje sa viac ako 1 MW na 1cm^2). Pri vytváraní hlbokého a úzkeho spoja vzniká para v dôsledku natavenia kovu. Vystupujúca para vytlačuje taveninu, natavenie je tak veľké, že vytvára hlboký a úzky otvor (kapilára) vyplnený parou. V kapiláre sa potom nachádza roztavený kov, ktorý začína tuhnúť. Po stuhnutí je zvarový spoj hotový. Hĺbka zvaru je niekoľkonásobne väčšia ako šírka. Účinnosť procesu je vysoká, pri natavených stenách kapiláry je odraz lúča viackrát násobný, vzniká tak vyššia teplota v zvarovom spoji.

Nevýhodou je pomerne náročné vytvorenie hladkého povrchu zvaru pre intenzitu vyššiu ako 10^6 W/cm^2 . Výhodou je možnosť zvarovať vysokou rýchlosťou a malá deformácia okolia zvaru. Tento druh zvarovania sa používa v prípadoch, keď je nutná veľká hĺbka zvaru alebo je nutnosť zvarovať viac vrstiev materiálu naraz. Princíp kontinuálneho zvarovania je na obrázku 23 vpravo.

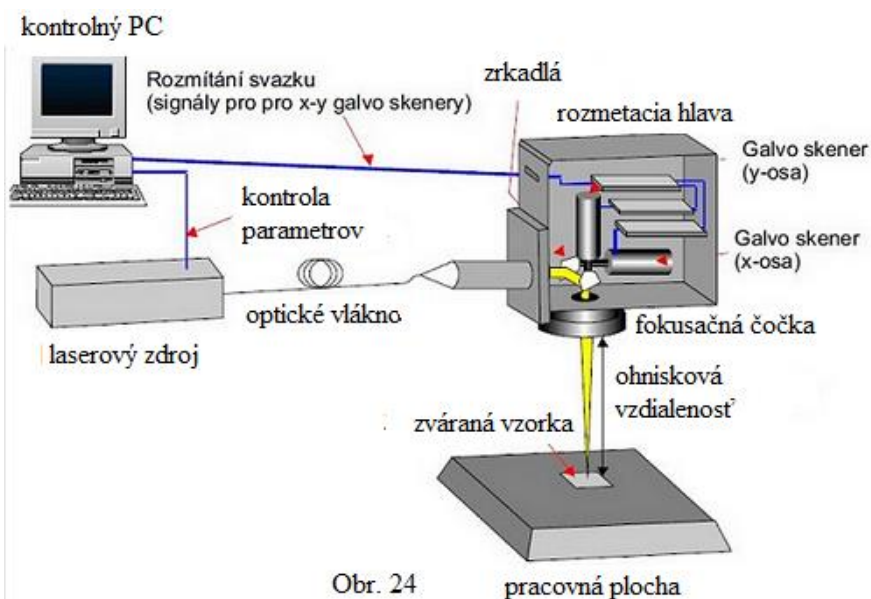


Obr. 23[8] [17]

3.3.4 Remote welding [33][39]

Vďaka rýchlemu rozvoju laserových technológií je možné optimalizovať výrobný proces pomocou „remote welding“ (ďal'kové zvarovanie). Táto technológia umožňuje fokusovať lúč na veľkú vzdialenosť medzi rozmetaciou hlavou a zvaraným vzorkom. Tento systém umožňuje rýchlejšie zvarovanie vďaka rýchlemu polohovaniu zväzku. Výhodou je tiež minimum neproduktívneho času. Rýchlosť systému je veľká, pretože hmotnosť rozmetacích zrkadiel je zanedbateľne nízka. Predpoklad použitia tejto technológie je veľký výstupný výkon laseru.

V minulosti túto podmienku splňovali len CO₂. Dnes sa používa vláknový laser, ktorého zdroj sa nemusí nachádzať v hlave, ale môže byť umiestnený mimo hlavy a optickým káblom privedený do hlavy. Schematické zobrazenie tejto technológie je na obrázku 24 [33].



Obr. 24

3.3.5 Parametre laserového zvarovania[4]

Od zvolených parametrov je závislý celý proces zvarovania, správna voľba ovplyvňuje kvalitu zvarového spoja. Za najdôležitejšie parametre laserového zvaracieho stroja sú považované nasledovné :

- Výkon primárneho laserové lúča

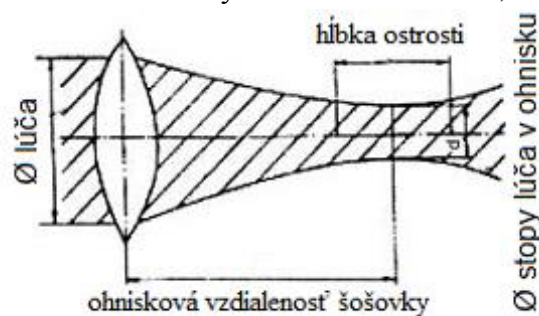
Energia je rozdeľovaná pomocou lúča, lúč ju rozdeľuje na plynulú alebo pulznú energiu. Táto energia závislá od druhu použitého zariadenia a od jeho výkonu.

- Rýchlosť zvarovania

Rýchlosť zvarovania je najväčšia prednosť laserového zvarovania. Je niekoľko násobne väčšia ako u ostatných typov tavného zvarovania. Platí všeobecná teória prestupu tepla. Výkon lúča a penetrácia do základného materiálu je nepriamo úmerná druhej odmocnine rýchlosti zvarovania. Rýchlosť zvarovania je pri laseroch veľmi široká, od niekoľkých mm/s až po 1000mm/s. Najväčším problémom je dodržanie rozmerových tolerancií hlavne, v kritickom začiatku a na ukončení zvarového spoja.

- Priemer stopy lúča

Laserový lúč sa šíri do všetkých strán (divergencia). Je to najdôležitejší charakter, ktorý určuje veľkosť stopy lúča, jej veľkosť sa reguluje pomocou šošoviek. Schematický obrázok 25.



Obr. 25

- Absorpcia materiálu žiarením

Aby bola spôsobená zmena základného materiálu, žiarenie sa do neho musí najskôr absorbovať. Rýchlosť a veľkosť absorpcie je závislá od množstva iných sekundárnych faktorov. Najdôležitejší faktor je intenzita reflexie zvarovaného materiálu. Ožiarenie materiálu laserom spôsobí zmenu materiálových a fyzikálnych vlastností.

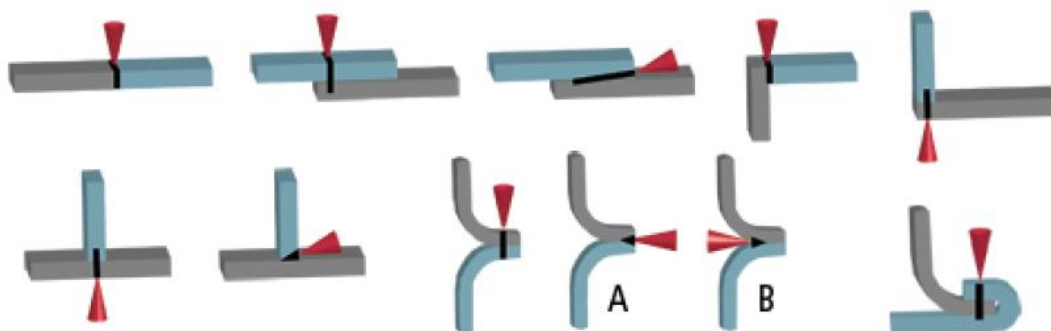
3.3.6 Príprava zvarového spoja [42]

Laserové zvarovanie je tavnou metódou. Vlastnosti zvarového spoja závisia na jeho príprave, použitého konštrukčného riešenia a výber správneho typu spoja. Základnými parametrami pre voľbu spoja sú:

- Typ spoja musí technologicky zahrňovať jedinečnosť laserového zvarovania
- Vhodné pre taký typ súčiastok, kde dosiahneme efektívnosť výroby a tam kde nie je možné použiť iný typ zvarovania
- Musíme zaobstarat' podmienky pre presné upínanie súčiastok pred zvaraním

Laserové zvarovanie prebieha bez prídavných materiálov, je to tavná metóda zvarovania. Spoje preto majú zväčša tvar tupého, preplátovaného, alebo prievarkového zvaru. Pri tupom zvaraní je nutný čo najtesnejší kontakt oboch zvarovaných plôch. Typy používaných spojov pri laserovom zvaraní sú znázornené na obrázku 26. Pokiaľ je zvaraná zostava dielov, kde nie je možnosť odstránenia začiatku a konca zvaru, používajú sa nábehové a výbehové dosky.

Jednou z výhod laserového zvárania je veľká hustota energie, vďaka tomu nie sú potrebné zvláštne požiadavky na čistotu povrchu zváraného materiálu. Musia byť odstránené otrepy po predchádzajúcom spracovaní. Je výhodou ak je zváraný povrch zaoxidovaný. Tento druh povrchu umožňuje vyššiu absorpciu lúča. Pokiaľ je materiál povrchovo upravený, je nutné ho v mieste zvaru odstrániť. Medzi povrchmi zváraných materiálov by nemala byť väčšia medzera ako 0,2mm. Zvárané materiály musia byť navzájom pevne uchytené a vzdialenosť medzi materiálom a zdrojom lúča by sa nemala meniť.



Obr. 26[42]

3.3.7 Tepelne ovplyvnená oblasť[48][49][54]

Teplo vložené do zváraného materiálu zvyšuje teplotu v zváranom materiály a spôsobuje vznik tepelne ovplyvnenej oblasti okolo zvarového spoja. Ohrieva sa len časť materiálu v okolí zvarových plôch. Porovnanie širok jednotlivých pásiem ovplyvnených oblastí podľa druhu použitej technológie je v tabuľke 2. Ďalšie parametre ovplyvňujúce veľkosť tejto oblasti sú:

- Druh zváraného materiálu a jeho tepelná vodivosť
- Spôsob zvárania
- Veľkosť zdroja tepla
- Rýchlosť zvárania
- Rozmery telesa

Pri zváraní laserom je šírka TOO v porovnaní s ostatnými technológiami menšia. Je to dané šírkou lúča, výkonom stroja a rýchlosťou zvárania.

Tabuľka 2 šírka TOO podľa typu zvárania [54]

Metóda zvárania	Šírka TOO [mm]		
	nad Ac1	nad Ac3	prehriata oblasť
MIG/MAG	3 až 8	0,3 až 1	0,1 až 0,3
Elektrostruskové zváranie	5 až 30	1 až 10	0,5 až 5
Elektrónové zváranie	0,3 až 1	0,3 až 1	0 až 0,1
Lasrové zváranie	0,3 až 1	0,3 až 1	0 až 0,1

3.4 Kvalita zvarového spoja [3][42]

Kvalita zvaru je vždy závislá od požiadaviek, ktoré na daný spoj sú navrhnuté. Zvary sa posudzujú na povrchu i pod jeho povrchom. Základný materiál je vždy homogénny, oproti tomu zváraný spoj je heterogénny. Jedná sa o súbor štruktúr, ktoré majú vo svojom objeme rôzne vlastnosti. Preto pri skúšaní týchto spojov je nutné odobrať viacero vzoriek, alebo je nutné previesť viacero meraní. Dôležité je tiež vybrať správne miesto pre odobranie vzorku.

3.4.1 Závady zvarových spojov [3][35][42]

Žiadny spoj vytvorený bežnými postupmi nie je dokonalý. V každom spoji sa nachádza určité množstvo submikroskopických závad. Tieto chyby sa nachádzajú vo všetkých kovových materiáloch, no ich zistenie je veľmi náročné, preto som sa sústreďoval najmä na vady makroskopické. Porucha spoja je každá odlišnosť od predpísanej technickej normy. Tieto vady môžu byť zjavné, teda zistiteľné zrakom pri bežnej obhliadke alebo skryté, ktoré zisťujeme pomocou prístrojov alebo laboratórne. V zhode s predpismi môžu byť závady prípustné alebo neprípustné.

Rozdelenie závad zvarov podľa polohy:

- Povrchové
- Vnútorne

Podľa charakteru sa závady označujú normou ČSN EN ISO 6520-1 na:

- Trhliny (pozdĺžne, priečne, kráterové, nespojité ...)
- Dutiny (póry, bubliny...)
- Prímеси (oxidačné, kovové, tavidlové ...)
- Studený spoj (bez kovovej väzby, základný mat. nebol natavený ...)
- Vady tvaru a rozmeru (zápaly, vruby v koreni, neúplné vyplnenie zvaru...)

Vady vznikajú na základe nedodržaní technologických postupov pri zváraní, nevhodne zvolenou technológiou zvárania, mechanických vlastností materiálov. V nasledujúcom odstavci je stručný popis zvarových závad.

Vznik trhlín je závislý od teploty. Delíme ich na trhliny za tepla, trhliny za studena, žihacie trhliny a lamelárne trhliny. Trhliny za tepla vznikajú pri zmenách teplôt, pri ohrievaní a chladnutí spoja. Hlavným dôvodom vzniku je chemické zloženie materiálu. Trhliny za studena vznikajú až po ukončení procesu zvárania, nastávajú pri rozpadoch austenitu za pôsobenia vodíku. Dutiny rozlišujeme na póry a bubliny. Ich tvar je zväčša guľovitý, vznikajú v dôsledku nedostatočnej ochrannej atmosféry pred vzdušnou vlhkosťou. Zdrojom prímес v spojoch je nedostatočne očistený zváraný povrch. Studený spoj vzniká zlým natavením základného materiálu. Príčinou sú nevhodne nastavené parametre procesu zvárania. Príklad trhlín za studena v kútovom zvarovom spoji je na obrázku 27.



Obr. 27 [35]

Hodnotenie typu závad závislý od ich umiestnenia. Závady sa posudzujú podľa typu, orientácie a ich veľkosti. Vyhodnocuje sa vplyv väd na životnosť konštrukcie. Najnebezpečnejší typ závady sú trhliny. Vyhodnocujú sa podľa normy.

Klasifikáciu chýb, ktoré sa bežne vyskytujú v zvarových spojoch pri tavnom zvarení, špecifikuje norma ČSN ISO 6520 a ČSN EN 25871, v ktorých sú ich vlastnosti.

3.5 Kontrola zvarových spojov [50]

Kontrolu zvaraných plôch rozdeľujeme podľa toho aký vplyv majú na zvaraný spoj. Rôzne druhy súčiastok a druhy namáhania vyžadujú špecifické skúšky. Pre zložité aplikácie je nutné vykonávať komplexný súbor testov a v niektorých prípadoch je tiež nutné skúšky pravidelne opakovať.

- nedeštruktívne (nedochádza k mechanickému poškodeniu materiálu)
- deštruktívne (s mechanickým poškodením zvaru)

3.5.1 Nedeštruktívne skúšky [50]

Táto skupina skúšok je najrozšírenejšia. Súčiastka sa pri týchto typoch skúšok nepoškodí a je možné ju naďalej používať. Týmto skúškami nie je možné overiť pevnosť zvarového spoja, plastické vlastnosti, odolnosť proti namáhaniu a iné. Základné metódy pre kontroly spojov boli zvolené podľa umiestnenia zvaru na vonkajšiu a vnútornú stranu.

- Vizuálna skúška

Je najjednoduchšia a najlacnejšia defektoskopická kontrola zvarov. Spoje sa skúmajú pomocou zraku alebo lupou. Podľa prístupnosti ju delíme na priamu (miesto je dostupné a viditeľné) a nepriamu (nutnosť použiť optických prístrojov, napr. endoskop). Na prevedenie tejto skúšky musí byť skúmaný povrch očistený a prístupný. Je tiež nutné zabezpečiť dostatočné osvetlenie. Tento druh kontroly je zväčša doplnený o kontrolu vonkajších rozmerov, zároveň by mala predchádzať všetkým ostatným kontrolám. Vykonávanie tejto skúšky sa riadi normou ČSN EN 970.

- Penetračná – kapilárna skúška

Skúška odhaľuje povrchové vady, ktoré musia byť otvorené (spojené z povrchom). Pri tejto skúške sa využíva kapilárny jav (zmáčavosť, vztlínivosť). Na začiatku skúšky je nutné pripraviť povrch zvaru. Táto príprava zahŕňa umývanie a odmastenie povrchu. Ďalším krokom je naniesenie skúšobnej kvapaliny na povrch súčiastky (malé zvarenice ponorom, veľké nástrekom, alebo náterom). Skúšobná kvapalina – penetrant, musí zatiecť do všetkých dutín, doba penetrácie je až 30min. Po uplynutí doby penetrácie je nutné zvarenec dôkladne umyť. Potom dôkladne usušiť a naniesť vývojku ktorá vytvorí kontrast. Chyby zvarov sú viditeľné a môžeme ich vyhodnocovať. Podľa detekčných prostriedkov rozdeľujeme skúšku na metódu farebnej indikácie alebo metódu fluorescenčnú. Je nutné dodržiavať stanovenú normou kapilárnej skúšky ČSN EN 579-1 a vyhodnotenie podľa ČSN EN 1289.

- Ďalšie typy nedeštruktívnych skúšok
 - magnetická prášková skúška
 - ultrazvuková skúška (impedančná, akustická, odrazovo - rezonančná)
 - skúška prežiaraním (RTG),
 - skúška tesnosti

3.5.2 Deštruktívne skúšky [11] [43] [44]

Vlastnosti ako je pevnosť zvarového spoja, plastické vlastnosti spoja, odolnosť proti namáhaniu nie je možné určiť z nedeštruktívnych skúšok. Deštruktívne skúšky sú paralelou k skúškam mechanických vlastností materiálov. Tieto skúšky prebiehajú na zvláštnych kusoch (skúšobné výrobky, kontrolné zvarané spoje) určenými len pre skúšky a ich vyhodnotenie. Je však nutné dodržať všetky technologické podmienky, ktoré sa používajú aj pre zváranie spojov. Všetky deštruktívne skúšky sú normalizované, aby bolo zabezpečené vzájomné porovnanie výsledkov.

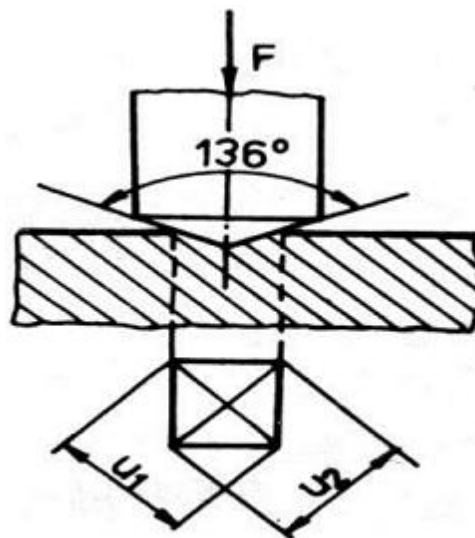
- Skúška tvrdosti

Tvrdosť je charakterizovaná ako odpor materiálu proti vnikaniu cudzieho telesa. Pomocou týchto skúšok získavame informácie o lokálnych vlastnostiach materiálu v spoji a jeho okolí. Zmenou tvrdosti môžeme určiť nárast pevnosti a pokles plastických vlastností. Meranie tvrdosti slúži i ku kontrole kvality tepelného spracovania. Pre meranie tvrdosti sa používajú skúšky podľa Brinella, Vickersa a Rockwela. Z odrazových skúšok sa najčastejšie používa skúška podľa Shoreho. Každá zo skúšok ma svoju stupnicu, preto rôzne metódy tvrdosti získané rôznymi druhmi skúšok sú rozdielne.

Pri Vickersovej skúške tvrdosti sa do povrchu materiálu zatláča diamantové teliesko, pravouhlý štvorboký ihlan s vrcholovým uhlom medzi stenami $\alpha = 136^\circ$ so skúšobným zaťažením. Doba zaťaženia je 10 až 15 sekúnd. Vzďialenosť vtlačkov musí byť minimálne 2,5 násobok šírky uhlopriečky. Hodnota tvrdosti sa určuje zmeraním uhlopriečok vzniknutého vtlačku. Princíp Vickersovej skúšky je na obrázku 28. Označenie normy je ČSN EN ISO 6507-1

V prípade Brinellovej skúšky tvrdosti rovnomerne vtlačujeme guľôčku z tvrdokovového materiálu normalizovaného priemeru. Menšie priemery guľôčky sa používa pre zistenie lokálnej tvrdosti, veľké pre zistenie priemerných hodnôt tvrdosti. Zaťažujúca sila sa volí tak aby priemer vtlačku bol v rozmedzí 0,24 až 0,6 krát priemer guľôčky. Vzďialenosť jednotlivých vtlačkov musí byť minimálne trojnásobok ich priemeru. Hodnota tvrdosti sa určuje podľa tabuliek ktoré sú súčasťou normy ČSN EN ISO 6506-01.

Počas Rockwellovej skúšky tvrdosti sa do povrchu skúšaného materiálu vtlačuje diamantový kužeľ s vrcholovým uhlom 120° a s polomerom hrotu 0,2mm (používa sa stupnica HRA, HRC), alebo tvrdokovová guľôčka priemeru 1/16 palca (používa sa stupnica HRB). Táto metóda je vhodná pre použitie v praxi, vďaka jej rýchlosti a jednoduchosti. Tvrdosť sa odčíta priamo zo stupnice tvrdomera. Najčastejšie sa používa meranie v stupnici HRC. Označenie normy Rockwellovej skúšky je ČSN EN ISO 6508-1.



Obr. 28

- Skúška mikro a makro štruktúry

Táto skúška odpovedá norme ČSN EN 1321. Pre túto skúšku je nutné pripraviť metalografický výbrus, aby bolo možné pozorovať prierez zvaru. Pri makroskopickom rozbere v zvarovom spoji odlišujeme 3 základné oblasti: zvarový kov, tepelne ovplyvnená oblasť a základný materiál.

- Ďalšie typy deštruktívnych skúšok:
 - priečna skúška ťahom (ČSN EN 895)
 - skúška lámavosti (ČSN EN 910)
 - skúška rázom v ohybu (ČSN EN 875)
 - skúška rozlomením (ČSN EN 1320)

3.6 Bezpečnosť pri práci s lasermi [5] [29]

Pri práci s laserovým zariadením existuje riziko zdravotného ohrozenia. Lasery sú nebezpečné z dôvodu veľkej koncentrácie energie v lúči, ktoré sú zvyčajne v neviditeľnom spektre. Laser pôsobí na všetky živé tkanivá, ale aj na životné prostredie. Účinky je možné rozdeliť na tepelné, netepelné a vedľajšie.

Používanie a bezpečnostné opatrenia pri požívaní takéhoto zariadenia je vymedzené podľa nariadenia vlády č.1/2008 (novela 2010). Nariadenie určuje laser ako druh zariadenia, ktoré môže byť upravené na zosilňovanie alebo vytváranie elektromagnetického žiarenia, v rozsahu vlnových dĺžok optického zariadenia. Sú to zariadenia ktoré sa v prírode nevyskytujú, sú teda umelo vytvorené. Príklady najvyšších prípustných hodnôt žiarenia sú uvedené v nasledujúcej tabuľke 3.

Tabuľka 3 žiarenia laserov [29]

	Vlnová dĺžka [nm]	Trvanie [s]	Výkon/energie
I.	630 (He-Ne)	$10 < \tau < 10^4$	$P = 3 \cdot 10^{-7} \text{ W}$ $E = 3 \cdot 10^{-3} \text{ J}$
II.	514,5 (Argón) 630 (He-Ne)	$\tau > 2,5 \cdot 10^{-1}$ kontinuál.	$P = 1 \cdot 10^{-3} \text{ W}$ $P = 1 \cdot 10^{-3} \text{ W}$
III. A	630 (He-Ne)	kontinuál.	$1 \cdot 10^{-3} < P < 5 \cdot 10^{-3}$
III. B	530 (Nd:YAG, 2harm)	$1 \cdot 10^{-4}$	$E = 0,6 \text{ J}$
		$1 \cdot 10^{-8}$	$E = 3 \cdot 10^{-2} \text{ J}$
	694 (rubín)	$1 \cdot 10^{-3}$	$E = 1,2 \text{ J}$
		$1 \cdot 10^{-8}$	$E = 3 \cdot 10^{-2} \text{ J}$
	1060 (Nd:YAG)	$1 \cdot 10^{-4}$	$E = 2 \text{ J}$
		$1 \cdot 10^{-8}$	$E = 3 \cdot 10^{-3} \text{ J}$
IV	všetko nad vyššie uvedené hodnoty pre triedu III. B		

Trvalý priamy pohľad do zväzku laserového lúča je možné iba pri 1. triede laseru, pri laseroch 2. triedy je pohľad do lúča možný, ak oko ochráni mrkanie. Pri ostatných trie-

doch nie je možné pozorovať zväzok lúčov bez ochranných pomôcok, aby nedošlo k poškodeniam zraku.

3.6.1 Ochrana pri práci [5][28][36]

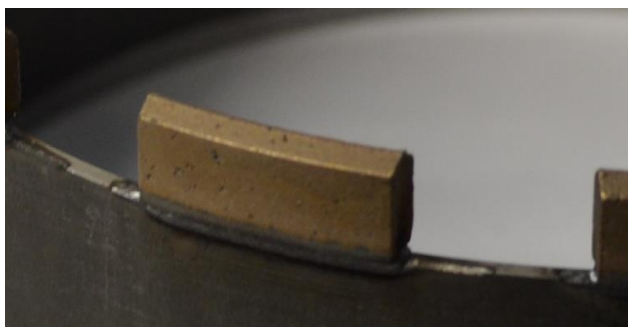
Základnými ochrannými pomôckami sú okuliare vybavené sklom, ktoré neprepustí žiarenie vlnovej dĺžky v závislosti od používaného laseru. Každý druh laseru využíva inú vlnovú dĺžku, preto je nutné vybrať správne ochranné sklo. Je tiež nutné chrániť si kožu rukavicami a kombinézami z materiálov, ktoré odrážajú žiarenie daných vlnových dĺžok. Pracovisko vybavené laserom musí byť riadne označené výstražnými tabuľkami, vid' obrázok 28. Obrázky zvyknú byť doplnené slovným upozornením spolu s označením triedy laseru.



Obr. 29 [28][36]

4 NÁVRH RIEŠENIA

Mojou úlohou bolo zvoliť optimálne parametre laserového zvarovania rezných doštičiek k telesu jadrového vrtáku pre vŕtanie do železobetónu. Tieto parametre som volil pomocou experimentu za rôznych podmienok, ktoré som vyhodnotil. Laserové zvarovanie som zvolil pre jeho schopnosť zväť rozličné typy materiálov rôznych hrúbok, za krátky časový interval, s malou tepelne ovplyvnenou oblasťou. Príklad laserom zvarenej doštičky je na obrázku 30.



Obr.30

4.1 Voľba laserového zariadenia [39]

Laserové zvarovanie sa dnes rozširuje a využíva ho množstvo aplikácií v priemysle, avšak aj klasické metódy zvarovania majú v priemysle svoje stále miesto. Pre proces zvarovania sa v priemyselnej praxi používajú hlavne lasery zobrazené v tabuľke 4. Ich použitie sa líši podľa požiadaviek na kvalitu spoja, druhu spájaného materiálu a finančným možnosťam. V nedávnej dobe sa v priemysle používali hlavne CO₂ lasery. Ich nevýhodou je vlnová dĺžka laseru (10,6μm), ktorá je podobná ako absorpcia väčšiny kovov. Ich účinnosť je o jeden rád menšia ako u pevno látkových laserov. V porovnaní s pevno látkovými lasermi je tiež nevýhodou zložitá zostava zrkadiel u CO₂ laserov.

Tabuľka 4 základný prehľad priemyslových laserov [39]

laser	účinnosť	režim	výkon/energia	aplikácie	údržba	životnosť [h]
Nd:YAG	7%	kontinuálny	až 6 kW	R, Z	áno	10 000
		pulzný	100 W	O, G		
	3%	pulzný	600 W	Z, R		1 000
CO ₂	10%	pulzný/kvázipulzný	10-250 W	O, G, R	áno	20 000
			až 5 kW	R, Z		
	25%		až 20 kW	R, Z		/
Diskový	15%	kontinuálny	až 16 kW	R, Z	áno	10 000
Vlákno-vý	30%	kontinuálny	až 80 kW	R, Z	nie	100 000
		kvázipulzný	1,2 kW	R, Z		
		pulzný	100W	O, G, M		
Diódový	60%	kvázipulzný	až 10 kW	Z, K, N	nie	15 000

kde : R - rezanie, Z - zvarovanie, G - gravírovanie, K - kalenie, N - nanášanie vrstiev, M – mikro obrábanie, O - označovanie

Vzhľadom na výhody a nevýhody ostatných laserových technológií som sa pre moju úlohu rozhodol použiť pevno látkový Yb-YAG laser. Je to moderné zariadenie ktoré nahrádza pevno látkové kontinuálne Nd:YAG lasery a rovnako aj CO₂ lasery. Výhodou sú malé rozmery zariadenia, vysoká kvalita zväzku a nízky príkon. Chladenie tohto typu laseru je intenzívnejšie a vhodnejšie ako pri kotúčových laseroch. Pri vláknových laseroch je vlákno chladené vzduchom. Nie je nutné ich zložitě nastavovanie, alebo použitie špeciálnej optiky. V mojej práci som použil laser od firmy IPG ktorá je jednotkou v oblasti výkonných vláknových laserov, pôsobí celosvetovo od roku 1990. podrobný popis v prílohe 2

4.1.1 Zvárací stroj [19]

Laserové zváranie som vykonal na Ústave prístrojovej techniky AV ČR kde sa nachádza pracovisko vybavené vláknovým laserom (obr. 31) o nasledujúcich parametroch.:



Obr. 31

Zvárací stroj:	Vláknový laser Yb-YAG, YLS-2000
Rozmery stroja:	1106 x 856 x 806 (dĺžka x šírka x výška)
Menovitý výkon stroja:	2000 W
Vlnová dĺžka:	1070 nm
Procesná rýchlosť:	do 10 m/min
Laserová hlava je umiestnená na robotickom ramene od firmy ABB s parametrami :	
Dosah robota:	cca 1600x1000x600 mm
Nosnosť polohovadla:	250 kg
Presnosť:	0,03 až 0,07 mm

4.2 Zvarové podmienky vzorku 1[7][31][53]

Proces optimalizácie zvarových podmienok bude prebiehať v dvoch častiach.

- V prvej časti sa budem venovať ladeniu zváracích parametrov tak, aby vytvorený zvarový spoj bol kvalitný. Pre rôzne nastavenia parametrov prevediem skúšky mikrotvrdosti a rozbor makro a mikro štruktúry.
- V druhej časti sa rezné doštičky privaria na nosnú časť vrtáku najvhodnejšími parametrami podľa najlepších výsledkov z predchádzajúcich experimentov v prvej časti.

Polotovár pre vytvorenie zvaru je bezšvová valcovaná oceľová trubka materiálu ČSN 11373 / S235JRG1. Je to neúšľachtilá konštrukčná oceľ bežnej akosti, tavná zvariteľnosť je zaručená. Obyčajne sa používa na mierne staticky i dynamické namáhané zvarované konštrukcie, jednoduché mierne namáhané, kované, lisované a za studena ohýbané súčiastky. Mechanické vlastnosti ocelí sú v tabuľke 5 a chemické zloženie je v tabuľke 6. Trubka bude spojená s reznou doštičkou.

Tabuľka 5[7]

Označenie podľa ČSN/EN	Mechanické vlastnosti			
	R _m [MPa]	R _{e min} [MPa]	Tvrdosť HB	Ťažnosť A10 [%]
11373 / S235JRG1	340-370	186	max 225	8

Tabuľka 6[7]

Chemické zloženie oceli ČSN 11373 / S235JRG1 [%]						
C	Mn	P	S	Cr	N	Cu
Max 0,17	0,8	max 0,04	max 0,04	max 0,25	max 0,007	0,55

- Uhlíkový ekvivalent

Pri posudzovaní zvariteľnosti je nutné vypočítať uhlíkový ekvivalent.

$$c_{ekv} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr}{5} + \frac{\%Ni}{13} + \frac{\%Mo}{4} + \frac{\%Cu}{13} + \frac{\%P}{2} + 0,0024 \cdot t \quad (5.1)$$

$$c_{ekv} = 0,17 + \frac{0,8}{6} + \frac{0,55}{5} + 0 + 0 + 0 + \frac{0,04}{2} + 0,0024 \cdot 2,5 = 0,41\%$$

Ak je $c_{ekv} \leq 0,45\%$ a zároveň musí platiť, že $C \leq 0,2\%$, a hrúbka zváraného materiálu $s \leq 25\text{mm}$. Pokiaľ sú splnené všetky parametre nie sú potrebné žiadne zvláštne opatrenia, pokiaľ nie je splnená niektorá podmienka je nutný predohrev materiálu, aby sa zamedzilo vzniku trhlín. Ekvivalent však nie je prepočítaný komplexne. Materiál reznej doštičky je neznámi a preto nemohol byť do výpočtu zahrnutý. Na jeho zistenie je potrebná ďalšia analýza. Predpokladal som však, že zvárací proces prebehne bez problémov. V mojom prípade materiál nosnej trubky splňuje obe podmienky zvarovania a nie je nutné používať predohrev.

4.2.1 Príprava zvarového spoja

Pred začiatkom zvarovania musí byť splnená podmienka rovného čela trubky a drsnosť nesmie prekročiť hodnotu Ra 3,2. Nosná trubka – polotovár, bola nepresne odrezaná,

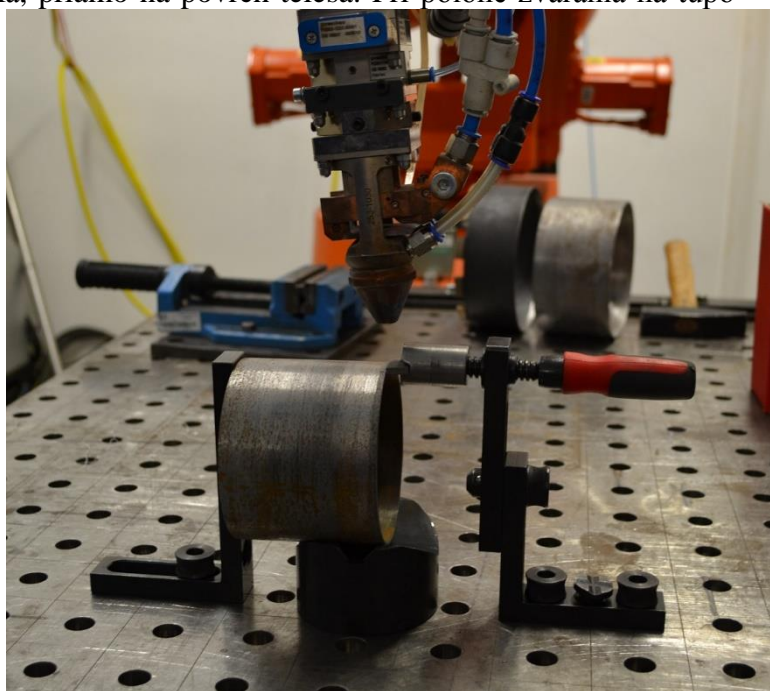
pre presné zvarenie bolo nutné zarovnanie čela na sústruhu, potom mechanické očistenie a následné odmastenie. Pre proces laserového zvarovania nie sú potrebné špeciálne roztoky na odstraňovanie mastnoty.

Na nosnú trubku o priemeru 110 mm je potrebné navariť osem kusov rezných doštičiek. Pre tento priemer nie je možné použiť viac rezných doštičiek bez ich vzájomného rozmerového a tepelného ovplyvnenia sa. Obvod nosnej trubky je potreba rovnomerne rozdeliť. Na to aby, bol vytvorený dokonalý spoj a podmienky sa nemenili, je nutné rovnaké vzájomné ustavenie zváraných dielov. Na tento účel slúžil upínací stôl Demmler, na ktorom bolo pomocou modulárnych úchytovej možnosť presne zostaviť reznú doštičku a nosnú trubku. Príklad zostavenia je na obrázku 32. Tento spôsob upnutia je časovo náročný, a je vhodný iba pre kusovú výrobu, k zisteniu kvality spoja bol však tento druh prípravy dostatočný.

4.2.2 Realizácia zvaracieho procesu

Na nosnú trubku som umiestnil 4 dvojice rezných doštičiek. Pre každú dvojicu rezných doštičiek som zvolil rozdielne zvaracie parametre. Prehľad týchto parametrov sa nachádza v tabuľke 7. Proces zvarovania prebiehal pod ochrannou atmosférou čistého argónu. Tento inertný plyn je ťažší ako vzduch, a klesá smerom k zváranému miestu, čo zaisťuje jeho dobrú ochranu pred vstupom nežiaducich plynov do zvaracieho priestoru.

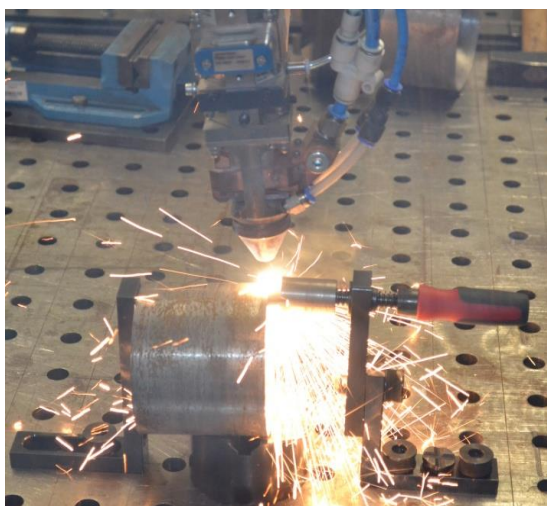
Po zostavení doštičiek bol laserový lúč fokusovaný do bodu dotyku medzi reznou doštičkou a nosnou trubkou vrtáka, priamo na povrch telesa. Pri polohe zvarovania na tupo nie je potrebná žiadna medzera. Pomocou diaľkového ovládania bol naprogramovaný chod laserovej hlavy. Tento proces bol vyskúšaný na nečisto (iba pohyb hlavy, bez tvorby zvaru) a následne skorigovaný. Pri procese zvarovania boli dodržané bezpečnostné predpisy. Medzi procesom zvarovania a obsluhou boli nainštalované bezpečnostné dvere s koncovým spínačom a priehľadným sklom vybavené fóliou, ktorá neprepustí žiarenie s nebezpečnou vlnovou dĺžkou. Na obrázku 33 je zachytený priebeh zvaru a na obrázku 34 vytvorený zvarový spoj.



Obr. 32 – konštrukcia prípravku

Po privarení prvej série štyroch párov doštičiek na trubku vrtáka, bolo nutné overenie presnosti ustavenia. Zvarenec bol upnutý do skľučovadla sústruhu, kde bolo po jeho rozrotovaní zistená nepresnosť v uložení doštičiek. Za pomoci posuvného meradla bolo zistené, že uloženie doštičky sa od pôvodného priemeru trubky 110 mm líši až o 1,5 mm. Preskúmaním zvarov som dospel k záveru, že doštičky sa vychýlili z dôvodu nepresné-

ho prípravku. Modulárny systém Demmler, nedovoľoval vždy rovnaké zostavenie, upínanie vyžadovalo prácnosť a časovú náročnosť, a aj napriek tomu bola presnosť nedostatočná. Pre presnejšie zostavenie bolo nutné skonštruovať kvalitnejší prípravok. Ďalším z faktorov nepresného usadenia je polomer reznej doštičky, ktorá bola určená na väčší priemer vrtáku ktorý bol odlišný od priemeru použitej trubky. Pre rôzne priemery trubiek sa používajú doštičky z patričným polomerom.



Obr.33 – proces zvarovania



Obr. 34- zvarový spoj

Počas procesu zvarovania jednotlivých dvojíc doštičiek, som upravoval podmienky, hlavne menovitý zvarací výkon a rýchlosť zvarovania. Uhol odklonu zvaracej hlavy voči ose nosnej trubky ostával nemenný. Umožňoval lepšie nastavenie ohniska do miesta medzi doštičkou a trúbkou. Prietok ochranného plynu (argónu) ostal tiež nemenný po celú dobu experimentu. Jeho množstvo bolo nastavené z ohľadom na skúsenosti obsluhy. Poloha ohniska bola nastavená k povrchu materiálu

Tabuľka 7. *Parametre zvarovania*

Číslo zvaru	zvarací výkon [W]	zvaracia rýchlosť [mm/s]	prietok ochranného plynu (Ar) [l/min]	poloha ohniska [mm]	uhol odklonu [°]	obrázok číslo	vytvorenie pevného zvaru
1.	1600	30	18	0	15	35 a) b)	áno
2.	1600	30	18	0	15		
3.	1600	40	18	0	15	36 a) b)	áno
4.	1600	40	18	0	15		
5.	1700	50	18	0	15	37	nie
6.	1700	50	18	0	15		
7.	1900	50	18	0	15	38 a) b)	áno
8.	1900	50	18	0	15		

4.2.3 Vizualne vyhodnotenie procesu [32]

Ako prvá procese zvarovania bola vykonaná vizuálna skúška. V našom prípade priama, podľa ČSN EN ISO 17637 (051180). Každá dvojica spojov bola označená, a bola overe-

ná kolmosť návarku a rozteče. Na každej dvojici bola vykonaná kontrola zvaru a následná experimentálna úprava podmienok.

- Prvá dvojica zvarov je na obrázku 35 a) a b) vidieť lícnu a rubovú stranu spoja. Koreň zvaru je prevarený v celej dĺžke spoja. Je viditeľné natavenie reznej doštičky pri nábehu spoja a prepal spojený s prepadom zvarovej kúpele na jeho konci. Koreň zvaru nekopíruje obvod trubky. Na základe tohto zistenia bola upravený program pre chod laserovej hlavy.

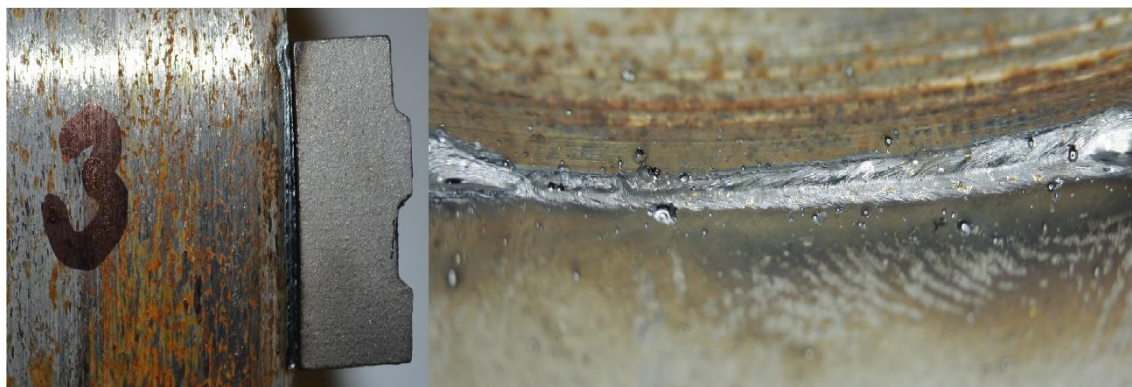


a) lícna strana

obr.35

b) rubová strana

- Druhá dvojica zvarov je na obr. 36 a) a b) vidieť lícnu a rubovú stranu spoja. V tomto prípade došlo k pevnému spojeniu. Na oboch stranách spoja vznikol pri zváraní rozstrek. Pri nábehu zvaru je patrný prepal a natavenie reznej doštičky. Zvar je rovnomerne zaliaty, nie je nutná ďalšia korekcia chodu hlavy.



a) lícna strana

Obr. 36

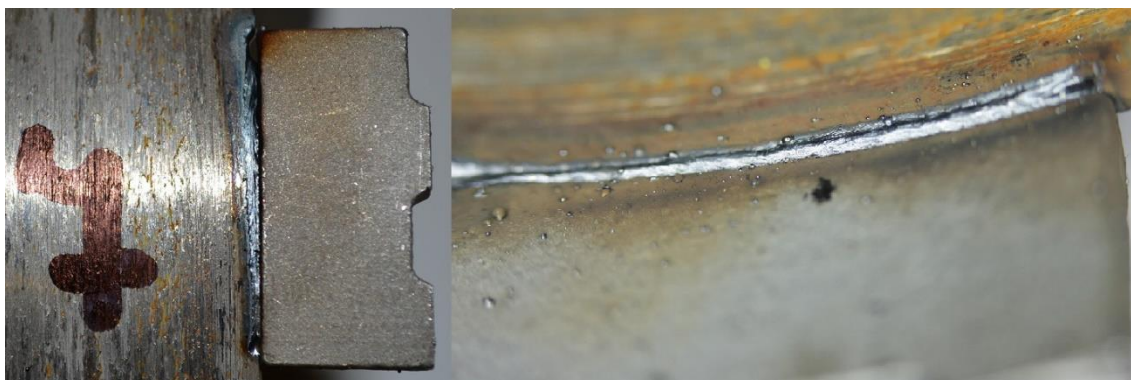
b) rubová strana

- Na obr. 37 je tretia dvojica zvarov, kde boli zvarové podmienky nevhodne nastavené a došlo k porušeniu zvaru. Plocha na telese vrtáka je natavená dostatočne, avšak nedošlo k nataveniu reznej doštičky. K rozpadu zvaru došlo až po jeho schladnutí a vybratí z prípravku. Ďalšou možnosťou rozpadu spoja je nepresné ustavenie.



Obr. 37

- Posledná dvojica zvarov je na obr 38 a) a b) vidieť lícnu a rubovú stranu spoja. Zvar nepresne kopíruje obvod trubky, preto je pri nábehu natavená nosná trubka a na konci zvaru rezná doštička. Tento problém vznikol nepresným upnutím do prípravku. Z rubovej strany je vidieť rozstrek.

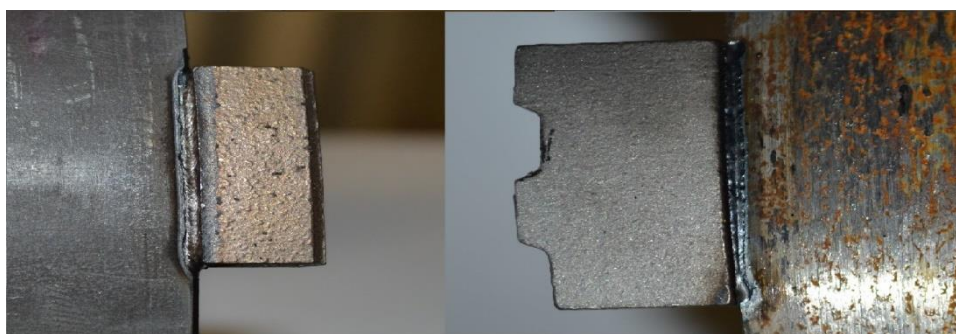


a) lícná strana

Obr. 38

b) rubová strana

Po vytvorení spojov som mal možnosť porovnať vytvorené zvary s konvenčne predávaným jadrovým vrtákom od firmy HILTY/Würth, vytvoreným tiež technológiou laserového zvarovania. Porovnanie je na obr. 39 kde vľavo je detail zvaru konvenčného vrtáku a vpravo experimentálne vytvoreného. Na obrázku vľavo je viditeľná väčšia tepelne ovplyvnená oblasť na nosnej trubke, aj na reznej doštičke. Zvar je po celej dĺžke rovnomerný, pri jeho nábehu je rovnako ako na mojom vzorku rovnaké natavenie a prepád. Pre vyhodnotenie zvarov je však optické vyhodnotenie nedostatočné, preto je nutné vykonať ďalšie skúšky.



Obr. 39

4.2.4 Výpočet vneseného tepla [24]

Počas procesu zvarania, materiál absorbuje časť žiarenia a premení sa na tepelnú energiu. V tejto kapitole porovnáme teplo vnesené do jednotlivých zvarových spojov

$$Q_s = \frac{\mu \cdot U \cdot I}{v_s \cdot 1000} = \frac{P_s}{v_s \cdot 1000} [kJ \cdot mm^{-1}] \quad (5.2)$$

Kde :

Q_s	-	špecifické vnesené teplo	$[kJ \cdot mm^{-1}]$
U	-	zvárací napätie	$[V]$
I	-	zvárací prúd	$[A]$
μ	-	koefficient účinnosti	$[-]$
v_s	-	zváracia rýchlosť	$[mm \cdot s^{-1}]$
P_s	-	zvárací výkon	$[W]$

Tento vzorec vznikol úpravou výpočtu používaného pri zvaraní oblúkovými metódami. Pre výpočet vneseného tepla do materiálu pri laserovom zvaraní sa tiež používa, avšak vypočítaná hodnota nie je úplne zhodná zo skutočnou hodnotou, z meraní bolo zistené, že reálne hodnoty pri laserovom zvaraní sú nižšie.

- Vzorka 1-2

$$Q_s = \frac{P_s}{v_s \cdot 1000} = \frac{1600}{30 \cdot 1000} = 0,0553 [kJ \cdot mm^{-1}]$$

- Vzorka 3-4

$$Q_s = \frac{P_s}{v_s \cdot 1000} = \frac{1600}{40 \cdot 1000} = 0,042 [kJ \cdot mm^{-1}]$$

- Vzorka 5-6

$$Q_s = \frac{P_s}{v_s \cdot 1000} = \frac{1700}{50 \cdot 1000} = 0,034 [kJ \cdot mm^{-1}]$$

- Vzorka 7-8

$$Q_s = \frac{P_s}{v_s \cdot 1000} = \frac{1900}{50 \cdot 1000} = 0,038 [kJ \cdot mm^{-1}]$$

Najväčšie vnesené teplo bolo do materiálu dodané vo vzorku 1-2, naopak najmenšie dodané teplo do vzorku 5-6, čo spôsobilo nedostatočný prehrev materiálu. Vznikol studený spoj a následné odtrhnutie.

4.3 Prípravok

Vzhľadom na nedostatočnú presnosť upnutia rezných doštičiek k nosnej trubke pri prvom experimente, ktorý bol uskutočnený za pomoci modulárneho systému Demmler, nebolo možné dodržať kolmost návarok k ose vrtáku a rozdiel v priemere po privarení až +/-1,5mm od pôvodného ϕ 110mm. Jediný parameter, ktorý bol dodržaný, bola rozteč medzi reznými doštičkami. Takto vyrobený, vrták nie je možné v praxi použiť, ak

chceme dodržať presný rozmer vŕtanej diery. V praxi by nepresné zostavenie rezných elementov znamenalo ich vysoké opotrebenie a pri zaťažení až ich deštrukciu.

Vzhľadom na uvedené dôvody som sa rozhodol vytvoriť prípravok, ktorý by svojimi vlastnosťami umožňoval dodržanie stanovených rozmerov a kvality zvarov.

Podmienky ktoré boli stanovené na konštrukciu prípravku sú nasledovné:

- Jednoduchosť
- Hmotnosť
- Presnosť
- Jednoduchá obsluha

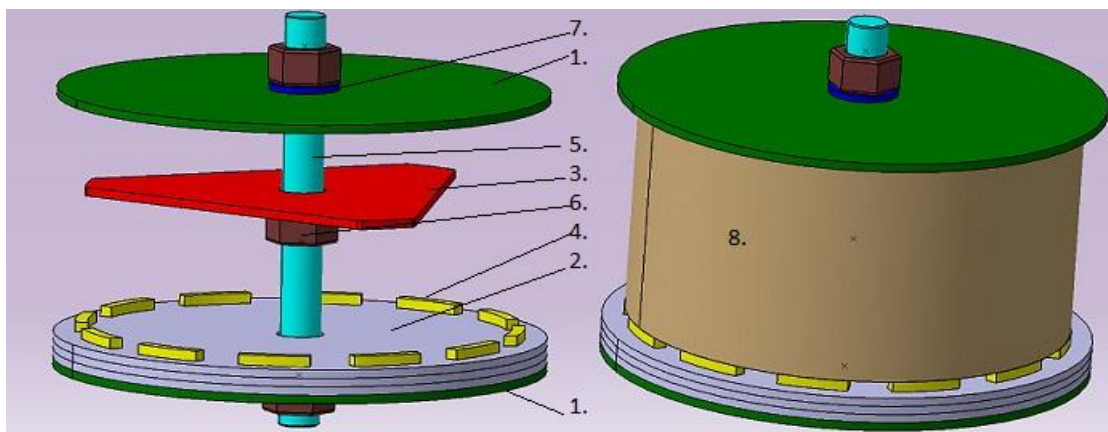
Na konštrukciu prípravku boli zvolené dostupné materiály, ľahko opracovateľné, bez nárokov na kvalitu povrchovej úpravy a ich nízku cenu – odpad z predošlej výroby vo firme AQUAdem, ktorá mi umožnila vyrobiť prípravok.

Nízka hmotnosť je zaručená použitými materiálmi, plechu hrúbky 3mm a tyčou zo závitom a maticou M16 a celkový rozmer prípravku je 165mm x 145mm. Celková hmotnosť prípravku nepresahuje 3kg.

Presnosť výrobu jednotlivých dielov garantoval CNC laserový rezací stroj s vláknovým laserom (BySprint Fiber 3015) riadený počítačovým programom podľa priloženej výkresovej dokumentácie v prílohe 1. Výroba prípravku konvenčnými strojmi, by bola časovo veľmi náročná, a konštrukcia prípravku by musel byť prispôbena týmto metódam výroby, vytvorením rádiusov a iných zaoblení.

Jednoduchosť konštrukcie prípravku bola zvolená tak, aby obsluha mohla byť aj menej zručná a aj napriek tomu, bude hotový výrobok dosahovať vysokú kvalitu.

V prípade potreby sériovej, alebo hromadnej výroby by bolo nutné konštrukciu prípravku upraviť. Namiesto upínania pomocou skrutky a matice zmeniť za upínací excenter (ako koleso na bicykli), alebo pritláčanie pomocou pneumatického, hydraulického alebo magnetického mechanizmu. Táto konštrukcia prípravku bola zvolená vzhľadom na kusovosť výroby. Boli pri nej rešpektované moje materiálové a finančné možnosti. Na obrázku 41 je vidieť skutočná podoba rozloženého prípravku, na obrázku 40 je vidieť 3D návrh vytvorený pomocou softvéru Catia v5.



Obr. 40

Popis vymodelovaného 3D obrázku 41:

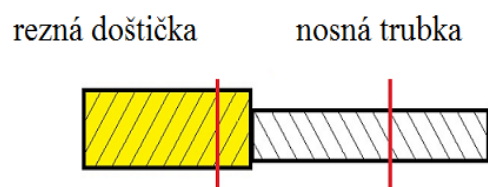
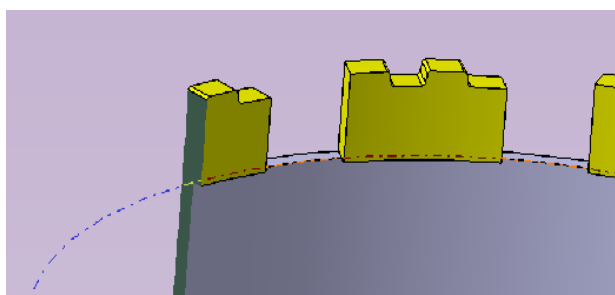
Zelená	1.	Základná a prítlačná doska
Šedá	2.	Doska s presnými vyrezanými otvormi
Červená	3.	Plech kalibrujúci teleso vrtáku v osy
Žltá	4.	Rezné doštičky
Modrá	5.	Závitová tyč M16
Hnedá	6.	Matica M16
T. modrá	7.	Podložka
Béžová	8.	Telo vrtáka



Obr.41

4.4 Metalografický výbrus

Pre ďalšie skúšky je nutné vytvoriť kvalitný metalografický výbrus. Je to deštruktívna metóda, pri ktorej musí byť skúmané miesto oddelené od zvyšku zvaru. Na rezanie rezných doštičiek s časticami diamantových zŕn nebolo možné použiť klasické rezanie na metalografickej píle alebo frézovanie. Vzhľadom k tvrdosti bol použitý vysokotlakový vodný lúč. Rezanie prebehlo vo firme AQUAdem s.r.o. V prvom kroku prebehol vodným lúčom priečny rez, aby bolo možné podrobne preskúmať miesto zvaru (obr. 42 vľavo). Na vzniknutom profile (obr.42 vpravo) bola rezná doštička skrátená za pomoci vodného lúča a nosná trubka za pomoci pásovej píly. Miesta sú na obrázku označené červenou farbou.



Obr. 42

Vypreparované vzorky boli zaliate do špeciálnej umelej hmoty. Po vytvrdnutí nasledovalo ručné brúsenie, v tomto prípade sa jednalo opäť o náročný proces z dôvodu tvrdých fáz v reznej doštičke, ktoré spôsobili poškodenie brúsneho papiera. Po naleštení nasledovalo naleptanie v 3% roztoku nitalu. Príprava metalografického vzorku bola v tomto prípade veľmi náročná, vzorka je zobrazená na obrázku 43.



Obr. 43

4.4.1 EDX analýza[14] [16]

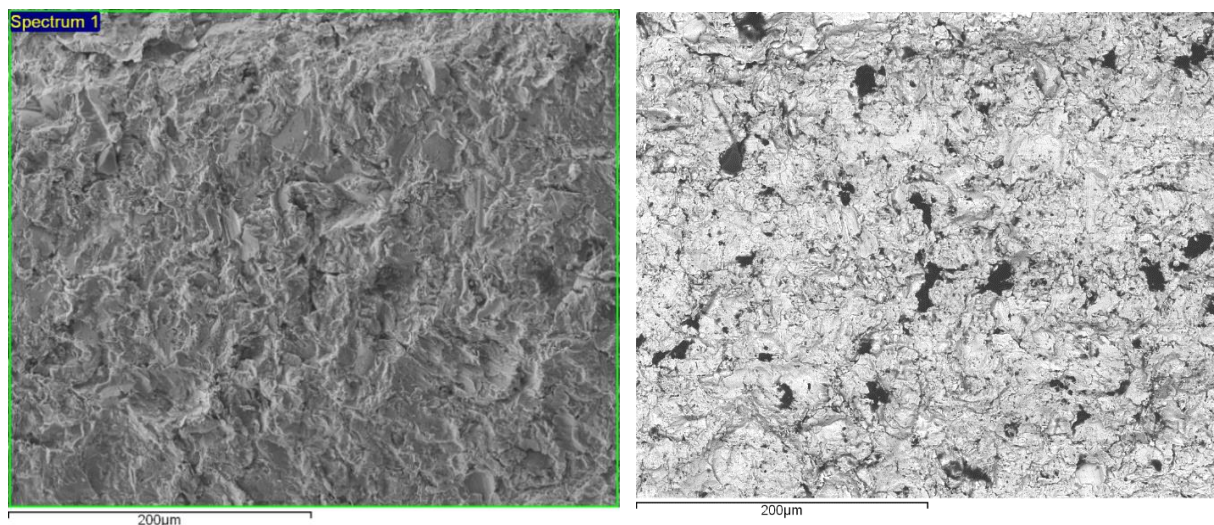
Vzhľadom na neznámi materiál reznej doštičky bola nutná jej analýza. Pre skúmanie štruktúry jej povrchu bola použitá energo-disperzná mikroanalýza EDX na elektrónovom mikroskope. Pred meraním bol povrch vzorku (rezná doštička) očistený acetónom. Na základe analýzy mapping, teda mapy plošne rozložených prvkov, bolo zistené chemické zloženie jednotlivých prvkov. Pri EDX analýze platí, čím tmavší prvok sa zobrazuje, tým je jeho atómová hmotnosť nižšia, naopak čím svetlejší daný prvok je (čím viac atómov odrazí) tým je jeho atómová hmotnosť väčšia. Získané chemické zloženie je v tabuľke 8. Nevýhodou analýzy EDX je nemožnosť presného stanovenia obsahu uhlíku.

Tab. 8 chem. zloženie reznej doštičky			
Chem. prvok	Hmotnostné %	Hmotnostné % sigma	Atómové %
C	2.33	0.14	10.27
Fe	48.94	0.12	46.37
Co	42.69	0.11	38.33
Cu	6.03	0.08	5.02

Skúmané miesto reznej doštičky sa nachádzalo na metalografickom výbruse. Štruktúra povrchu bola skúmaná pri podmienkach $U = 20 \text{ kV}$, $I = 9$, $t = 600 \text{ s}$, pôvodné zväčšenie 300x je zobrazené na obr. 44 kde:

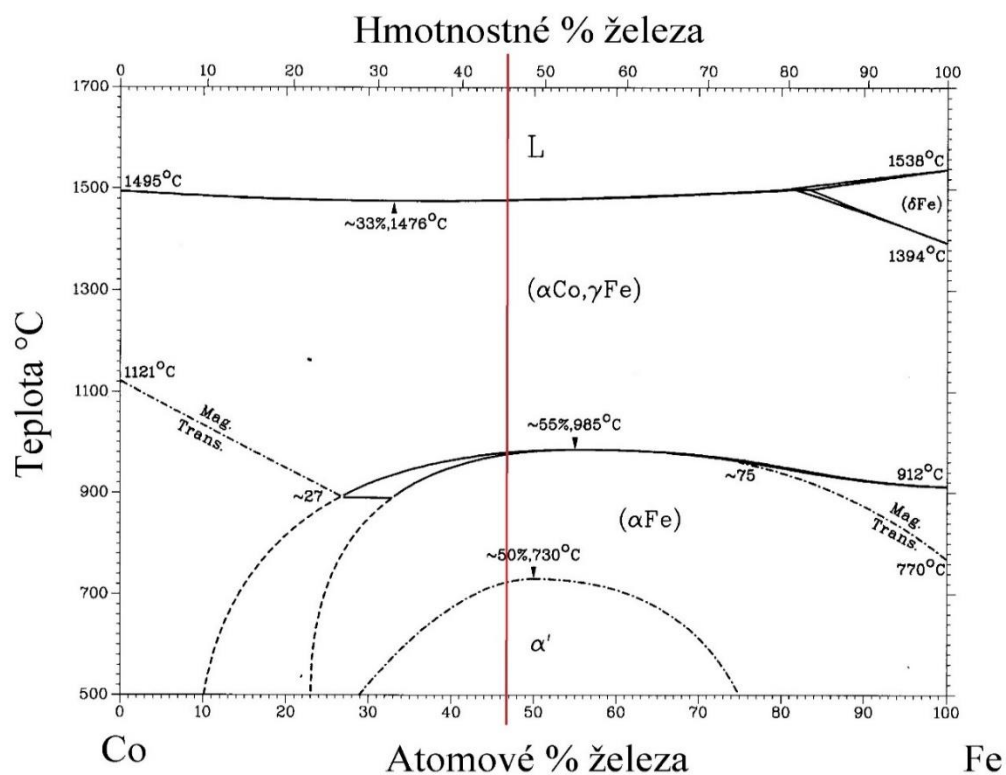
Vľavo : LEI elektrónový obraz získaný Everhart-Thornley detektorom (tvoria ho sekundárne, i odrazené elektróny). Pri tomto type zobrazenia je možnosť sledovať reliéf povrchu.

Vpravo: AUX1 elektrónový obraz získaný Autrata detektorom (tvoria ho iba odrazené elektróny) pri tomto type zobrazovania je možné pozorovať zloženie materiálu, rozličné prvky odrážajú rôzny počet elektrónov.



Obr.44

Na základe zistených prvkov z analýzy EDX, bola ako nosná časť diamantovej reznej doštičky zistená zliatina Fe-Co, ostatné prvky sa vyskytujú len v stopovom množstve. Fázový diagram zliatiny s vyznačeným obsahom železa je na obr. 45. V diagrame je možné pozorovať zmeny jednotlivých fáz pri zmene teploty.



Obr. 45[14]

Táto zliatina má podobnú teplotu tavenia ako oceľ nosnej trubky vrtáka. Preto nenastali žiadne problémy pri procese zvarovania. Jedná sa o podobné materiálové štruktúry.

4.4.2 Makroštruktúra a mikroštruktúra materiálu [9] [18] [34]

Makroskopické a mikroskopické skúšky spolu s vrubovými a defektoskopickými skúškami uzatvárajú možnosti testovania zvarových spojov. Makroštruktúra sa pozoruje pri malom zväčšení, buďto voľným okom alebo pomocou mikroskopu. Pomocou makroštruktúry skúmame zväčša tieto údaje :

- Kvalita spojenia (a či k nemu došlo/studený spoj)
- Charakter prechodovej oblasti zo zvaru do základného materiálu
- Akosť zvaru, nečistoty
- Hodnotenie väd, hlavne trhlín, dutín, bublín a nezavarených miest
- Hodnotenie tvaru zvaru, alebo spôsob nanášania jednotlivých štruktúr

Chyby zvarových spojov sú normalizované podľa normy EN 26520. V nasledujúcej tabuľke 9 je legenda k popisu makroštruktúrnych fotiek materiálu. Predpokladám, že na strane reznej doštičky bude šírka ovplyvnenej oblasti veľmi, malá v ideálnom prípade žiadna.

Pre potreby vyhodnotenia mikroštruktúry materiálu je potrebné veľké zväčšenie pozorovaného objektu. Mikroštruktúra je hodnotená podľa fázového zloženia mikroštruktúrnych zložiek. Vyhodnotenie makroskopickej a mikroskopickej štruktúry materiálu prebieha podľa normy ČSN EN ISO 17639.

K tomu účelu som využil konfokálny laserový skenovací mikroskop Olympus LEXT OLS 3100 ktorý je umiestnený v laboratóriu Ústavu prístrojovej techniky AV ČR. Pozorovanie vzorku prebiehalo v reálnom čase, a na rozdiel od elektrónových riadkovacích mikroskopov, sú vzorky umiestnené priamo na stolček mikroskopu, bez potreby použiť vákuovaciu komoru. Rozsahom zväčšenia je od 120x až po 14400x.

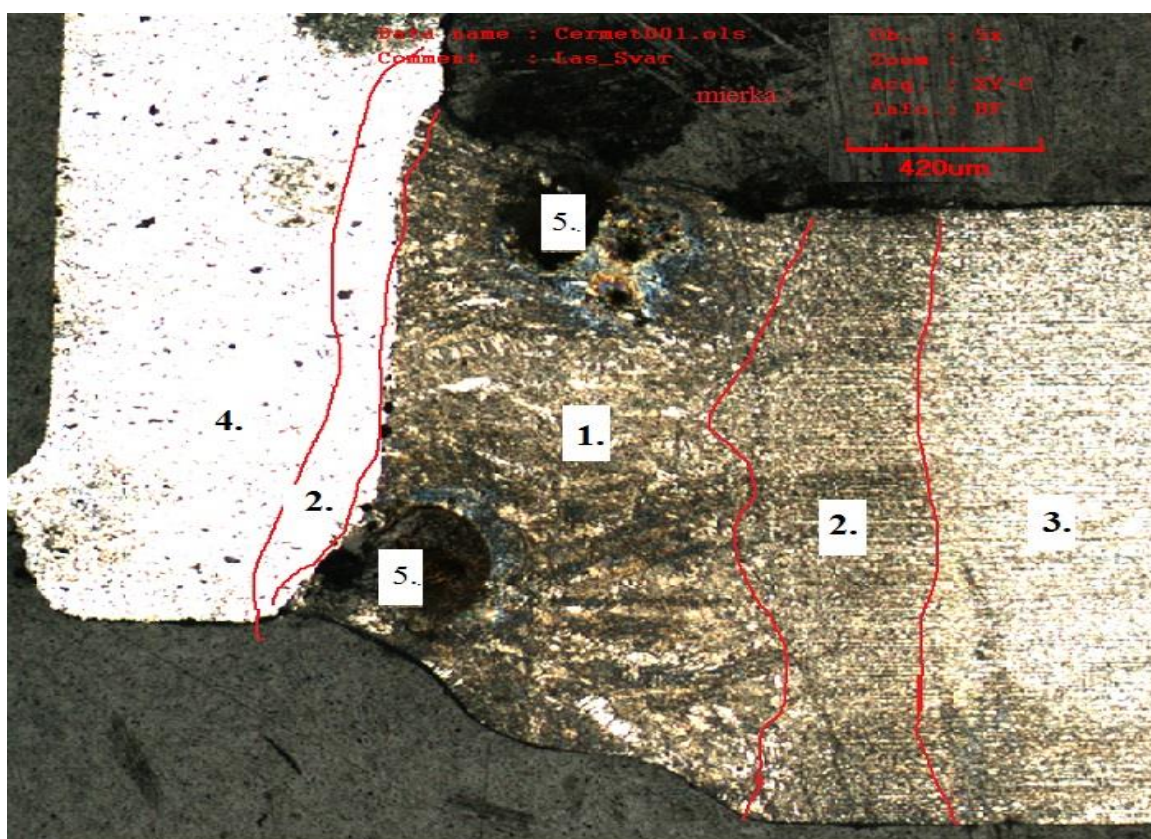
Tab.9 <i>legenda pre rozbor makroštruktúry</i>	
1.	Zvarový kov
2.	Tepelne ovplyvnená oblasť (TOO)
3.	základný materiál - oceľ
4.	základný materiál - rezná doštička
5.	Vady materiálu

- Spoj pri podmienkach 1-2 (obrázok 46)

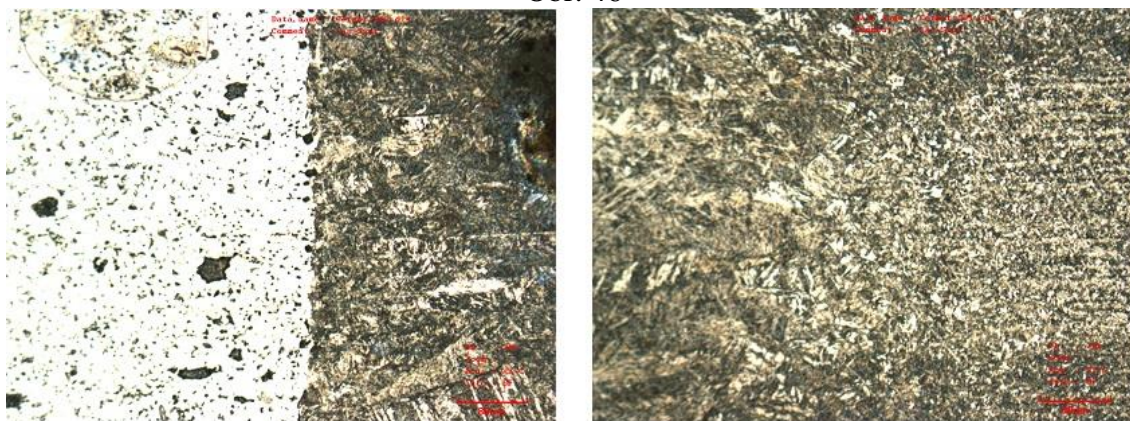
Pri tomto spojení bolo do zvarového spoja dodané najviac tepla $0,0553[kJ \cdot mm^{-1}]$. Priemerná šírka tepelne ovplyvnenej oblasti na strane reznej doštičky je $\sim 40\mu m$ (bod č.2 vľavo), podľa predpokladu je šírka tejto tepelne ovplyvnenej oblasti (TOO) menšia a ako TOO na strane ocelevej trubky. Jej šírka je $\sim 320\mu m$ (bod č.2 vpravo). V tejto oblasti je viditeľná zmena štruktúry oproti pôvodnej štruktúre (3). Nastalo tu zhrubnutie zrna v dôsledku dodaného tepla a chladnutiu. V zvarovom spoji (1) sú vidieť veľké kryštály martenzitu, ktorých smer natočenia je k reznej doštičke. Biele miesta v zvarovom spoji sú austenitické štruktúry. V mieste spojenia (2) vľavo sú jasne vidieť čierne oválne diery ktoré naznačujú studený spoj, pre jeho analýzu je nutné väčšie priblíženie. V spoji sa ukazujú dve vady materiálu označené č.5, sú to miesta kde nastal prepal materiálu. Po okrajoch týchto dier je patrná korózia, môže sa tiež jednať o vady ktoré vznikli prípravou vzorku. V oblasti č. 3 je vidieť pôvodná štruktúra materiálu, kde sú vidieť vodorovné ihlice, stopy po valcovaní ocele. Šírka TOO oblasti medzi 2-3 je výrazne širšia na spodnej strane, je jasne rozlíšiteľný smer pôsobenia laseru, ktorý vytvoril spoj.

Na obrázku 47 vľavo je zobrazený materiálový prechod medzi reznou doštičkou a zvarovým kovom, na ich rozmedzí sú vidieť čierne body ktoré značia neprevarené miesta - sú nežiadúce. Biela farba na povrchu reznej doštičky je Kobalt. Tmavé štruktúry v reznej doštičke sú tvrdé karbidy.

Na obrázku 47 vpravo je rozlíšiteľný pozvoľný prechod medzi základným materiálom a zvarovým spojom. Pri prechode sprava doľava je vidieť postupné hrubnutie zŕn na základe vneseného tepla. Sú tu viditeľné veľké dendritické kryštály. Štruktúra základného materiálu je veľmi členitá a zložená z mnohých fází. Biele prvky v základnej štruktúre sú austenit a martenzit, fáze sfarbené do oranžova sú feritické, tmavé miesta značia perlit.



Obr. 46



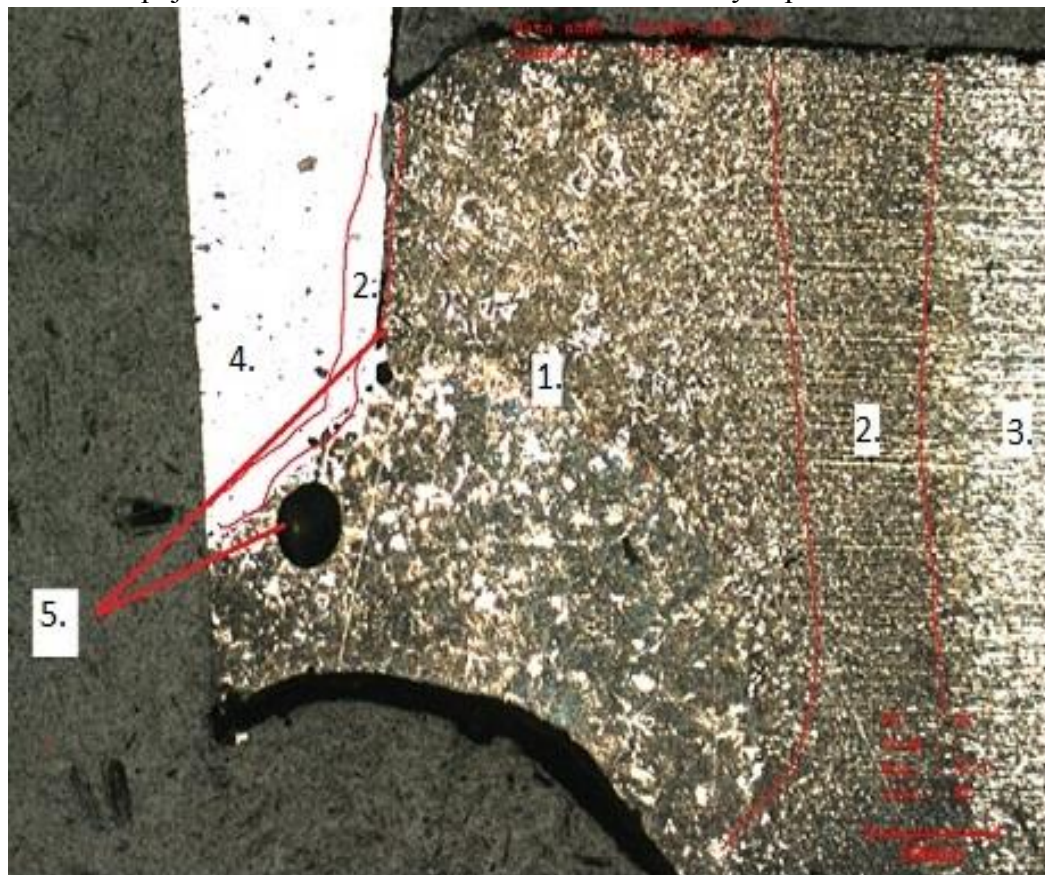
Obr. 47

- Spoj pri podmienkach 3-4 (obrázok 48)

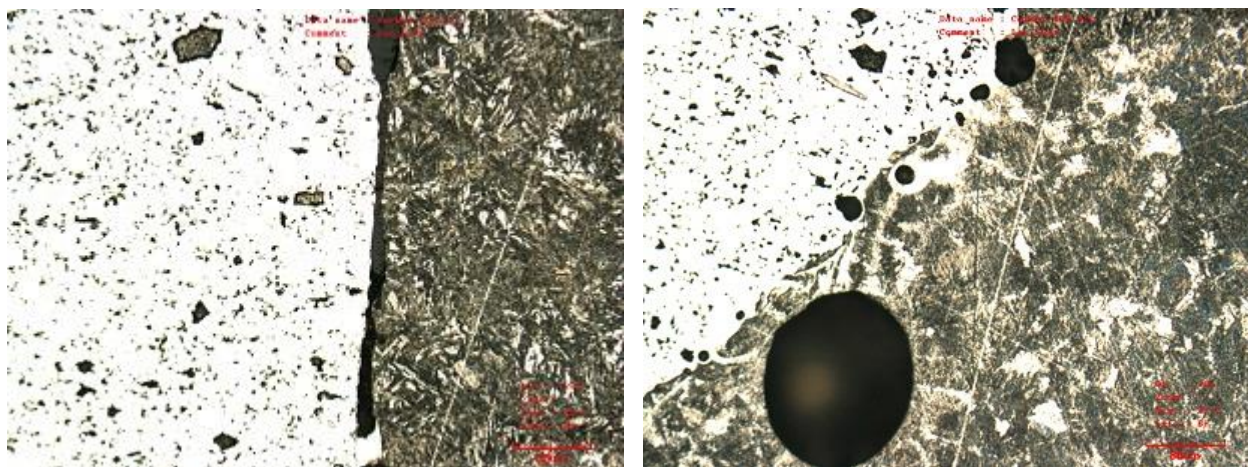
Pri tomto spojení bolo do zvarového spoja dodané $0,042[kJ \cdot mm^{-1}]$. V oblasti zvarového spoja (1) je vidieť roztavenie reznej doštičky, čo spôsobilo ovplyvnenie zloženia zvarového kovu. Ovplyvnenie je ohrozené farebným predelom. V oblasti zvarového spoja (1) je viditeľný veľký prepád zvaru (č.5). Táto porucha mohla byť spôsobená vzduchovou bublinou, alebo nahromadením množstva argónu. Natavenie doštičky má negatívny vplyv na kvalitu spoja. V oblasti 3. je vidieť pôvodnú valcovanú štruktúru nosnej trubky, s vodorovnými ihlicami - stopy po valcovaní ocele. Oblasť 2 v pravej časti obrázku meria v tomto prípade $\sim 305\mu m$. Je tu vidieť zhrubnutie zrn. Oblasť 2 a 3 má podobné zloženie ako v predchádzajúcom spojení, štruktúra sa nemení, mení sa iba šírka ovplyvnenej oblasti v závislosti na vnesenom teple. Prechod zo základného materiálu do TOO je ostrejší ako pri predchádzajúcich podmienkach.

Na rozhraní reznej doštičky a zvarového spoja Obr. 49 vľavo, je markantný prepád zvaru v celej dĺžke spojenia. Neprievar sa radí medzi vážne poruchy zvaru EN 2652 - 400. Táto vada nastala pri natavení doštičky, čo znemožnilo prevariť zvar v celej dĺžke. Štruktúra zvarového spoja vykazuje viac tvrdých dendridov ako v obrázku vpravo.

Na rozhraní reznej doštičky a zvarového spoja Obr. 49 je v zvarovom spoji väčšia štruktúra dendridických prvkov, biele miesta sú zbytky autstenitu. Na hranici doštičky a zvarového spoja sa nachádza množstvo dutín klasifikovaných podľa EN 2652 - 200.



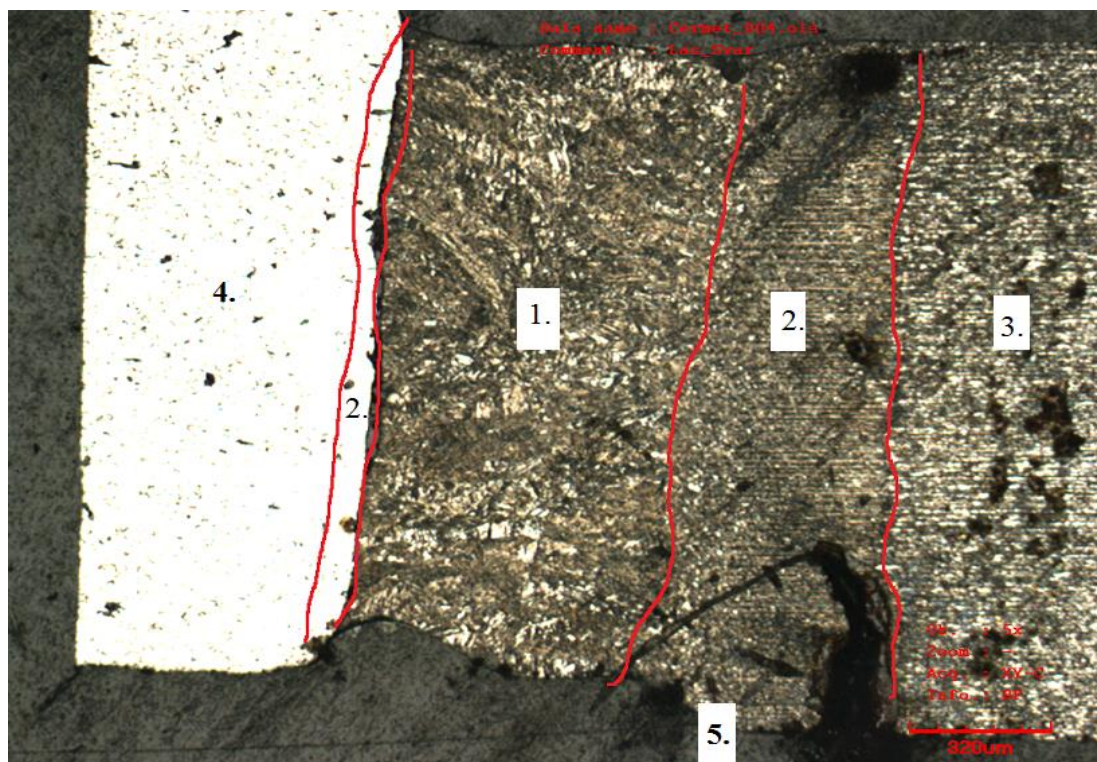
Obr. 48



Obr.49

- Spoj pri podmienkach 7-8 (obrázok 50)

Pri tomto spojení bolo do zvarového spoja dodané $0,038[kJ \cdot mm^{-1}]$. Pri týchto podmienkach sa vytvorili najmenšie TOO. Pri prechode zo základného materiálu do TOO nastáva ostrý prechod, s množstvom vád, a jasnou trhlinou na spodnej strane obrázku. Šírka TOO je $300 \mu m$. Zloženie zvarového spoja je rovnaké ako v predchádzajúcich prípadoch, no veľkosť zŕn je nepatrne menšia. Medzi fázami (1) a (2) došlo k studenému spoju na veľkej dĺžke spojenia. Potvrďuje to aj veľmi malá TOO na strane reznej dosičky $45 \mu m$.



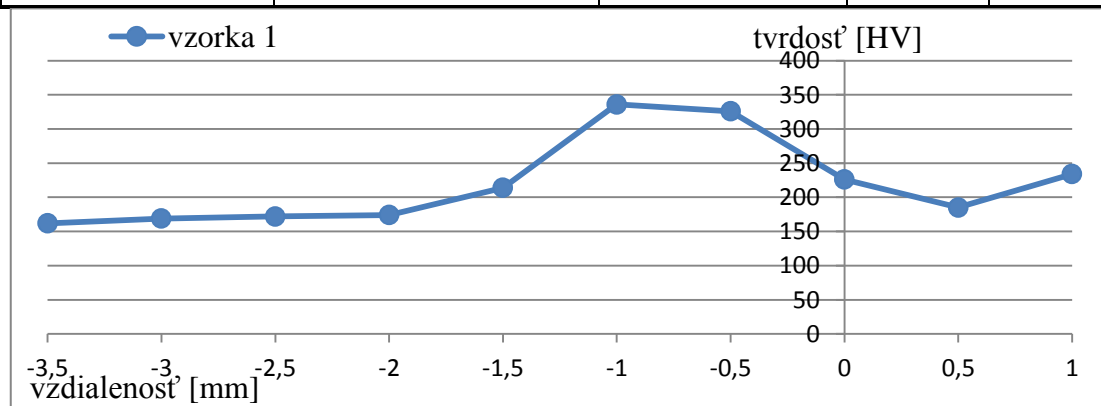
Obr. 50

4.4.3 Mikrotvrdosť

Meranie tvrdosti je dôležitou skúškou, na jej zistenie bola použitá skúška merania tvrdosti podľa Vickersa, ktorej princíp je popísaný v kapitole 3.5.2. Skúška bola vykonaná na zariadení ZWICK 3212, ktoré je určené na meranie tvrdosti a mikrotvrdosti. Prístroj je vybavený CCD kamerou, ktorá je prepojená s vyhodnocovacím softvérom SwtestExpert. Na to aby, bola skúška smerodatná, musí byť v každej testovanej súčasti minimálne 8 vpichov a ich vzdialenosť od seba musí byť minimálne 2,5 násobok šírky vpichu. Doba zaťaženia je v rozmedzí 10 – 14 sekúnd. Podrobnejšia fotodokumentácia v prílohe 3

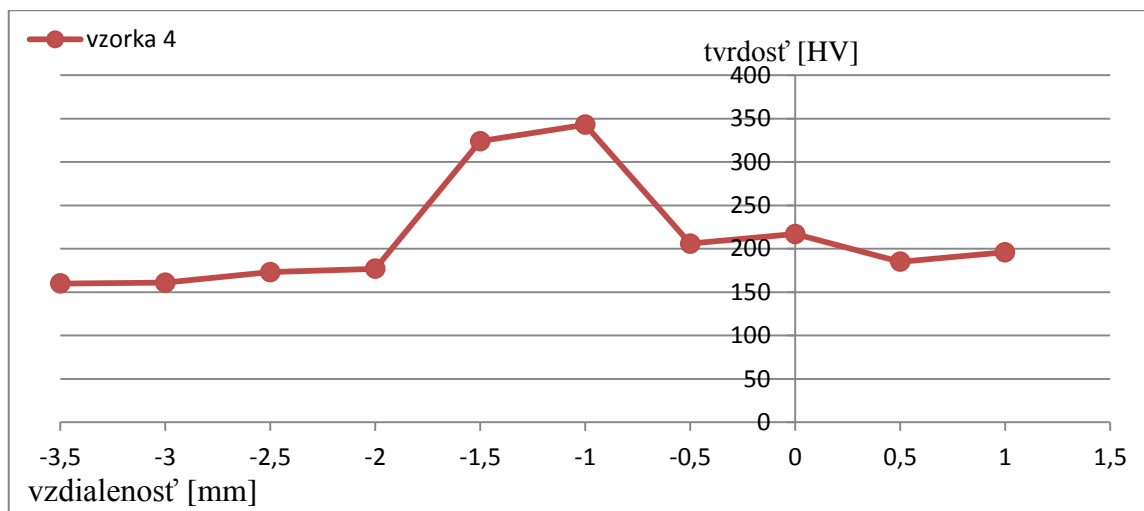
Vzorky, na ktorých bola meraná tvrdosť, boli totožné, ako pri skúmaní mikro a makro štruktúry. Vzdialenosť 0 v tabuľke (10 - 12) pri meraní tvrdosti označuje miesto rozhrania medzi zvarovým spojom a reznou doštičkou. Čísla idúce do záporu predstavujú vzdialenosť v milimetroch smerom ku koncu oceľovej trubky, kladné čísla predstavujú vpichy smerujúce k doštičke.

vzorka 1, tab. 10										
vzdialenosť [mm]	-3,5	-3	-2,5	-2	-1,5	-1	-0,5	0	0,5	1
tvrdosť [HV]	162	169	172	174	214	336	326	226	185	234
pozn.	základný mat + TOO				zvarový spoj			rozhranie doštička zvar spoj	rezná doštička	



Tvrdosti vzorky 1 sú v tabuľke 10. Najvyššia dosiahnutá tvrdosť je 336HV, nachádza sa v oblasti zvarového spoja. Prechod zo zvarového spoja do tepelne ovplyvnenej oblasti je plynulý. Najnižšia tvrdosť je v základnom materiáli a má 162HV, táto tvrdosť je v norme.

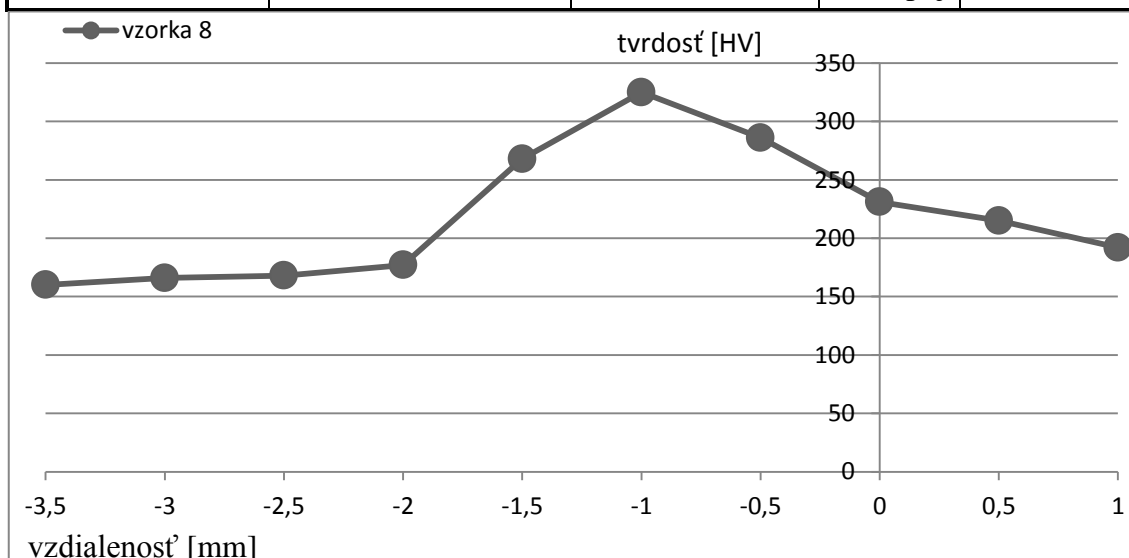
vzorka 4, tab 11										
vzdialenosť [mm]	-3,5	-3	-2,5	-2	-1,5	-1	-0,5	0	0,5	1
tvrdosť [HV]	160	161	173	177	324	343	206	217	185	196
pozn.	základný mat + TOO				zvarový spoj			rozhranie doštička zvar spoj	rezná doštička	



Tvrlosti vzorky 4 sú v tabuľke 11. Najvyššia dosiahnutá tvrdosť je 343HV, v rovnakom mieste, ako pri predchádzajúcej vzorke. Prechod z oblastí zvarového spoja do TOO je skokový. Najnižšia tvrdosť sa nachádza v základnom materiáli a jej veľkosť je rovnaká ako pri predchádzajúcej vzorke.

vzorka 8 tab. 12

vzdialenosť [mm]	-3,5	-3	-2,5	-2	-1,5	-1	-0,5	0	0,5	1
tvrdosť [HV]	160	166	168	177	268	325	286	231	215	192
pozn.	základný mat + TOO				zvarový spoj			rozhranie doštička zvar spoj	rezná doštička	



Tvrlosti vzorky 8 sú v tabuľke 12. Najvyššia tvrdosť je 325 HV, opäť v rovnakom mieste ako pri predchádzajúcej vzorke. Prechod z oblasti zvarového spoja smerom k základnému materiálu aj smerom k reznej doštičke je plynulý.

4.5 Vyhodnotenie kvality zvaru [46]

Namerané hodnoty z jednotlivých skúšok a pozorovaní boli zoradené do tabuľky 13.

Tabuľka 13 *vyhodnotenie skúšok*

Spojenie č.	Šírka TOO rez. doštička [μm]	Šírka TOO nosná trubka [μm]	Dodané teplo [$\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$].	Vážne chyby
1-2	52	320	0,055	Nie
3-4	48	305	0,042	Áno
5-6	X	X	0,034	Áno
7-8	45	300	0,038	Áno

Zo všetkých zváraných vzoriek, vychádzajú kvalitatívne najlepšie zvarové podmienky pri vzorke č. 1-2. Pri mikroskopickom skúmaní neboli pozorované žiadne závažné chyby, ktoré by mohli ovplyvniť pevnosť a kvalitu spoja. Vzhľadom na nižšiu zvariaciu rýchlosť bolo do zvaru dodané najviac tepla, a preto vznikli najširšie TOO, s plynulým prechodom do základného materiálu. Daný predpoklad bol overený skúškou tvrdosti, pri ktorej bol preukázaný postupný nárast tvrdosti v smere od základného materiálu k zvarovému spoju. Bola zaznamenaná aj najširšia TOO na strane reznej doštičky. Spoj medzi reznou doštičkou je celistvý, bez prepadu. Koreň zvaru bol v tomto prípade rovnomerný a nevznikal rozstrek. Chyby ktoré sú zobrazené na obrázku 46 pod číslom 5, vznikli až po výbruse vzorku. Poruchy vzniknuté na rozhraní reznej doštičky a zvarového kovu sú podľa normy ČSN EN ISO 6520-1 prípustné. Pre zopakovanie sú parametre spoja 1-2 uvedené v tab. 14. Ostatné zvaracie podmienky svojimi vlastnosťami nedosahovali uspokojivé výsledky.

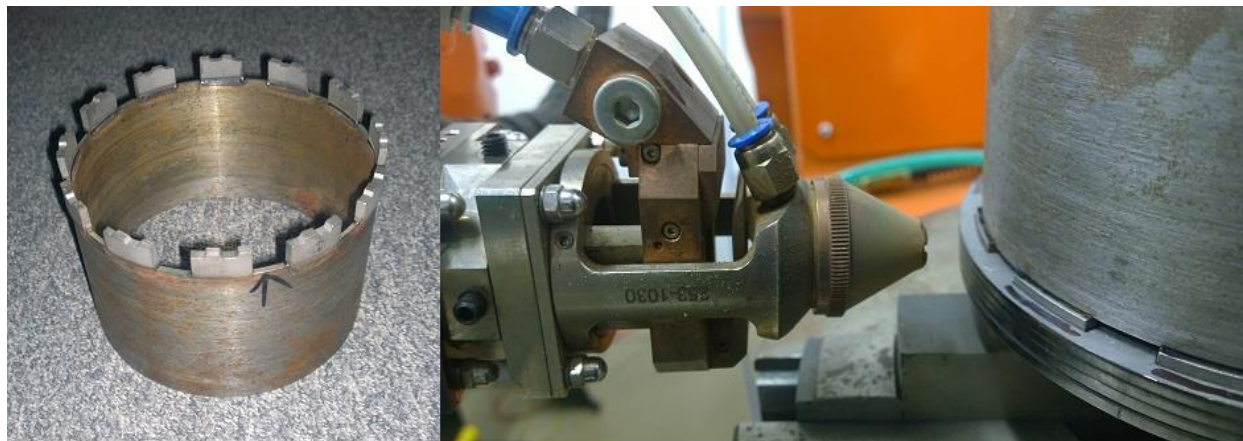
Tabuľka 14 *zvaracie parametre*

zvarací výkon [W]	zvaracia rýchlosť [mm/s]	prietok ochr. plynu Ar [l/min]	poloha ohniska [mm]	uhol odklonu [°]
1600	30	18	0	75

4.6 Zvarové podmienky vzorku 2

Pre zvarenie druhej vzorky som použil podmienky uvedené v tabuľke 14. Vzhľadom na skúsenosti pri zváraní prvej vzorky, bolo pri druhom experimente nutné použiť skonštruovaný prípravok. Rezné doštičky zapadli do prípravku bez problému, prípravok bol vyrobený presne. Rezné doštičky v prípravku pred zvarovaním sú na obrázku 51 vpravo. Na rezné doštičky bola položená nosná trubka vrtáku, ktorej dosadacia plocha musela byť pred upnutím do prípravku znova zarovnaná na sústruhu. Nosná trubka bola stiahnutá za pomoci matky M16 a prítlačnej dosky. Upínanie jednotlivých elementov do prípravku bolo značne jednoduchšie ako v predchádzajúceho upínacieho stolu Demmler, taktiež zabralo menej času a upínanie bolo presnejšie. Prípravok bol uložený na otočný stôl. Otáčanie stola, na ktorom bol prípravok umiestnený, bol zosynchronizovaný s programom robotickej ruky, na ktorej bola pripevnená zvaracia hlava. Program bol upravený tak aby na jedno upnutie, privaril všetky rezné doštičky naraz. Lúč lasera bol zafokusovaný priamo na rozmedzie doštičky a trubky s pomocou CCTV kamery umiestnenej na tele zvarovacieho laseru, ktorej obraz bol prenášaný do prenosnej obrazovky. Poloha ohniska bola nastavená presne na povrch vrtáka. Vzhľadom na dostatok rezných

doštičiek a väčší vonkajší priemer nosnej trubky jadrového vrtáku (150mm), bolo pre druhý pokus použitý 12ks rezných doštičiek. Vzďialenosť medzi segmentami bola dostatočná, vzájomne sa neovplyvnili. Po nastavení všetkých parametrov prebehlo samotné zváranie.



Obr.51

Výroba vrtáku prebehla úspešne, celý proces zvárania netrval viac ako 40s. Vybrať vrták z prípravku nebol problém. Rezné elementy mali v prípravku drobnú vôľu. Prípravok sa zváraním neporušil, a jeho funkčnosť bola overená. Vrták je vidieť na obrázku 51 vľavo. Všetky vytvorené spoje boli pevné, bez viditeľných väd a porúch. Doštičky boli navarené rovnomerne kolmo na osu. Overenie valcovitosti prebehlo upnutím a rozrotovaním v sklúčidle sústruhu.

5 TECHNICKO EKONOMICKÉ ZHODNOTENIE^[6]

Jadrové vrtáky je možné vyrábať rôznymi metódami. Jednotlivé ekonomické klady a zápory rôznych metód boli porovnané.

Pri zváraní pomocou laseru sú veľké vstupné náklady na zakúpenie potrebných technológií. Pri výpočte ceny za hodinu zvárania som počítal so sériovou výrobou s dobou odpisu na 5 rokov pri 3 zmennej prevádzke 5 dní v týždni (50 týždňov/rok). Celkový rozpis nákladov na hodinu laserového zvárania je v tabuľke 15.

Tabuľka 15	cena jednotková	Pozn.	Náklady/h [kč]
odpisy	9000000 kč	30000	300
elektrická energia	2,50/kWh	príkon 40	25
Ochranný argón	160 Kč/m ³	1,2 m ³ /hod	192
Stlačený vzduch	0,5 Kč/m ³	5Nm ³	3
Mzda operátora	180 Kč/hod	32% odvody	238
Spotrebné diely	50000 Kč/rok		8
Servis	50000 Kč/rok		8
CELKOM		Náklady /h	773
Réžia	200%		1547
Zisk	10%	Celk. Náklady/h	1702

Výsledná cena za hodinu zvárania je 1702 kč. Do výslednej ceny, pri zváraní laserom, nie sú započítané všetky náklady nutné na jeho prevádzku, konštrukciu prípravkov a ostatných pomocných technológií.

Alternatívou k výrobe jadrových vrtákov laserovým zváraním je možnosť výroby spájkovaním, pomocou striebra. Táto možnosť je finančne nenáročná (zistená cena hodiny spájkovania 300kč/h), nie je nutné náročné vybavenie. Jej nevýhodou je veľká časová náročnosť výroby, vhodná najme ku kusovej výrobe.

V tabuľke 16 je priame porovnanie nákladov na spájkovanie a na laserové zvárania. Bude v nej porovnaná cena na privarenie jednej reznej doštičky a na vytvorenie celého vrtáku. Doba zvárania je závislá na rozmere reznej doštičky. Náklady na vytvorenie doštičky sú závislá od počtu rezných doštičiek (v tomto prípade 12ks).

Tabuľka 16 <i>porovnanie nákladov</i>				
	Cena za sekundu zvaru	Doba zvárania 1ks reznej d.	Náklady na 1ks reznej doštičky	Náklady na vytvorenie vrtáku
Laserové zváranie	0,47 Kč	3,3 s	1,55 Kč	18,6 Kč
Tvrde spájkovanie	0,08 Kč	11 s	0,88 Kč	10,58 Kč

Náklady na vytvorenie vrtáku zahrňujú iba dobu spájania, nie je v nich zahrnutý čas prípravy spoja, náklady na prípravok atď. Finančne výhodnejšie vychádza variant tvrdého spájkovania.

Ďalšou možnosťou získania jadrového vrtáku je jeho zakúpenie u externej firmy (v našom prípade od firmy STYROTHERM). V nasledujúcej tabuľke 17 sú zoradené niektoré jadrové vrtáky podľa priemeru s cenou. Nevýhodou nákupu je nekompletnosť informácií o spôsobe pripevnenia reznej doštičky.

Tabuľka 17[6]

Priemer vrtáku [mm]	Orientačná cena
112	4 458,6 Kč
142	5 452,8 Kč
152	5 934,8 Kč
162	6 085,5 Kč

Cena spájkovania je až 2 násobne nižšia, avšak spoj nevykazuje požadovanú životnosť a kvalitu, doba výroby spoja spájkovaním je niekoľko násobne dlhšia. Životnosť tohto druhu spojenia je až 4x nižšia, ako pri výrobe spojov laserovým zvaraním. Dôvodom zníženej životnosti je veľké dodané teplo. Pri tepelnom a tlakovom zaťažení spoje praskajú. Z tohto dôvodu je ekonomickejšie použiť metódu zvarania laserom.

ZÁVERY

Výroba jadrového vrtáku pomocou technológie laserového zvarovania, je oproti iným metódam výroby, ako je napríklad tvrdé pájkovanie, alebo mechanické upínanie, pre vŕtanie do železobetónových konštrukcií najvhodnejšia. Laserové aplikácie majú v dnešnej dobe široké využitie ako napríklad rezanie, značkovanie a zvarovanie. Problematikou laserového zvarovania som sa zaoberal v teoretickej časti mojej práce.

Z množstva druhov laserových zariadení som pre experimentálne spojenie nosnej trubky jadrového vrtáku a rezných doštičiek použil vláknový Yb-YAG laser s širokým spektrom použitia, v ochrannej atmosfére argónu. Experiment sa skladal z dvoch častí, v prvej časti boli vyskúšané rôzne zvaracie podmienky. V druhej časti bol po vyhodnotení všetkých parametrov zvarový funkčný jadrový vrták.

V prvej časti boli rezné doštičky zvarované na nosnú trubku vrtáku o priemere 110mm. Na trubku boli privarené 4 páry rezných doštičiek, každý pár pri iných zvaracích parametroch. Vzhľadom na rozmerové nepresnosti vznikla nutnosť konštrukcie špeciálneho prípravku, pre toto zvarovanie. Prípravok sa vyznačoval jednoduchou obsluhou a presnosťou výroby.

Na prvej vzorke bolo najskôr vykonané vizuálne vyhodnotenie oboch strán zvarového spoja a prepočet vneseného tepla. Vnesené teplo bolo najväčšie u prvej vzorky. Okrem podmienok pri spoji 5-6 vznikol všade pevne zvarovaný spoj. Následne bol náročne vytvorený metalografický výbrus, na ktorého kvalite záviselo vyhodnotenie ďalších skúšok.

Na výbruse bola vykonaná analýza EDX na elektrónovom mikroskope, kde bolo zistené chemické zloženie reznej doštičky. Nosná časť rezných diamantov je zliatina Co-Fe. Vyhodnotenie mikro a makro štruktúry povrchu prebehlo pod mikroskopom, na vzorkách boli pozorované jednotlivé šírky TOO a chyby v zvarovaných spojoch. Na skúšky tvrdosti bola aplikovaná metóda merania podľa Vickersa. Namerané hodnoty boli zoradené do tabuľky. Prudký nárast tvrdosti znamená zhrubnutie zrna, čo je nevhodné. Postupný nárast tvrdosti a teda vhodné parametre boli namerané iba pri vzorke č.1.

Po vyhodnotení všetkých skúšok ktoré som vykonal na prvej vzorke, boli vybrané najvhodnejšie parametre pre zvarovanie druhého jadrového vrtáku s priemerom 150mm a dvanástimi kusmi rezných doštičiek. Pre zvarovanie tohto vrtáku boli použité rovnaké parametre, ako v spoji 1-2. Zvarací výkon, bol 1600W a zo všetkých podmienok najmenšia zvaracia rýchlosť 30mm/s. Tým bola overená aj funkčnosť prípravku. Bolo overené, že metódou laserového zvarovania je možné vytvoriť jadrový vrták. Nevýhodou sú vysoké vstupné náklady na tento druh technológie.

FSI VUT	DIPLOMOVÁ PRÁCA	List 59
---------	-----------------	---------

ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

1. AB SANDVIK COROMANT – SANDVIK CZ s.r.o Příručka obrábění – Kniha pro praktiky. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia, s. r. o. ,1997. 857 stran. Přel. z: Modern Metal Cuttig – A Practical Handbook. ISBN 91-97 22 99-4-6
2. Ar laser welding [online]. 2009 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://www.laserforum.cz/index.php?PHPSESSID=oofjujs79pjl8nu9va49aqvkm4&action=dlattach;topic=1216.0;attach=1540;image>
3. BARTÁK, Jiří. Typy vad, příčiny jejich vzniku a hodnocení. In: Česká svářečská společnost ANB [online]. 2012 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://www.cwsanb.cz/t.py?t=2&i=384>
4. BENKO, Bernard, Peter FORDEK, Miroslav KOSEČEK a Róbert BIE-LAK. Laserové technológie. 1. vydanie. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2000. ISBN 80-227-1425-9
5. BOZP. LETOVSKÁ, Magdalena. Ochrana zdraví při práci s lasery [online]. 2011 [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: http://www.bozpinfo.cz/win/knihovna-bozp/citarna/tema_tydne/BOZP_lasery110923.castpata.html
6. Ceny jadrových vrtákov. Cenník jadrových vrtákov [online]. 2015 [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: <http://www.jadrove-vrtanie.eu/inpage/vrtacie-korunky/>
7. ČSN 11373. Nelegovaná ocel obvyklých jakostí pro konstrukce [online]. 2009 [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: <http://www.czferrosteel.cz/pdf/profilky4-11373.pdf>
8. Deep penetration welding [online]. 2015 [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://www.trumpf-laser.com/en/solutions/applications/laser-welding/deep-penetration-welding.html>
9. Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Makroskopická a mikroskopická kontrola svarů. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
10. Diamantové segmenty pro vrtání [online]. 2012 [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: http://www.bld.cz/Fotografie/Zbozi/Original/tt_korunky_prstynkove.JPG
11. DOLEŽAL Pavel, B. Pacal, Hodnocení mikrotvrdosti struktur materiálů, VUT v Brně Fakulta strojního inženýrství Ústav materiálových věd a inženýrství, [cit. 2014-04-10] <http://ime.fme.vutbr.cz/Files/Studijni%20opory/hmsm/Mikrotrvdost.pdf>
12. Elektromagnetické spektrum [online]. 2014 [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://vesmirny-web.webnode.cz/neviditelna-astronomia>
13. FRANTA, Tomáš. Vysokopevnostní ocelové plechy svařované laserem. MM Průmyslové spektrum [online]. 2012, roč. 15, č. 9, s. 1 [cit. 2015-04-27]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/vysokopevnostni-ocelove-plechy-svarovanelaserem.html>

FSI VUT	DIPLOMOVÁ PRÁCA	List 60
---------	-----------------	---------

14. Fázový Co-Fe diagram. Himikatus.ru [online]. 1984 [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: <http://www.himikatus.ru/art/phase-diagr1/Co-Fe.php>
15. GELETA, V a J ZONGOR. STU BRATISLAVA. Laser v obrabani [online]. 2003 [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://www.kvs.sjf.stuba.sk/NT/LASER%20V%20OBR%20C3%81BAN%20C3%8D.pdf>
16. GOODGE, J. Energy-dispersive detector [online], 2009.[Cit. 2014-6-10]. Dostupné z: <http://serc.carleton.edu/18414>
17. Heat conduction welding [online]. 2015 [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://www.trumpf-laser.com/en/solutions/applications/laser-welding/heat-conduction-welding.html>
18. Hodnocení kvality svarového spoje. Teoretický úvod k cvičení z předmětu Technologie I. . [online]. 2002-10-08 [cit.2015-04-12]. Dostupné z: http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/TE1/def_kontrola_sv.pdf
19. IPG ILS-2000. Vláknový laser Yb-YAG [online]. 2010 [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: http://www.ipgphotonics.com/apps_materials_multi_yls.htm
20. Jádový vrták Clipper [online]. 2009 [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: <http://www.profinaradie.sk/hq-tools/product/21831-Jadrový-vrták-Clipper-O-TIP-CDTF-X3/>
21. Jádové vrtací korunky řady Premium [online]. 2015 [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://www.huddy.cz/assets/images/products/187/196.jpeg>
22. Jádový vrták vzor [online]. 2002 [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://www.spojovacimaterial1.sk/web/katalogkat/remis%20LS.jpg>
23. Jádový vrták: vrtacia korunka DIA [online]. 2011 [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: http://priemyselnytovar.sk/7496-thickbox_default/jadrový-vrták-vrtacia-korunka-dia-110-x-400-mm.jpg
24. KOUKAL, Jaroslav, Drahomír SCHWARZ a Jiří HAJDÍK. Materiály a jejich svařitelnost. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2009, 240 s. ISBN 978-80-248-2025-5.
25. KORNADA, Petr. Polovodičové lasery. In: [online]. [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: http://people.fjfi.cvut.cz/sulejan1/ult/11_polovodicove_lasery.pdf
26. KOŘÁN, Pavel. LAO – PRŮMYSLOVÉ SYSTÉMY. Průmyslové lasery (2) - svařovací lasery [online]. 2012 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-2-svarovaci-lasery.html>
27. KUSALA, Jaroslav. Typy laserů [online]. SVĚT ENERGIE, 2004 [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k23.htm>
28. Laser radiation. Laser safety [online]. 2011 [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Laser_safety#/media/File:Laser-symbol-text.svg

FSI VUT	DIPLOMOVÁ PRÁCA	List 61
---------	-----------------	---------

29. Laserové technologie v praxi II. CHMEÍLKOVÁ, Hana. Bezpečnost práce s lasery [online]. Olomouc, 2011 [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: <http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/lt2-pr1.pdf>
30. Laserové plazma a jeho aplikace [online]. CVUT, 2010 [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://www-troja.fjfi.cvut.cz/~limpouch/MFFlect.pdf>
31. LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření. 4. dopl. vyd. Úvaly: Albra, 2008, xiv, 914 s. ISBN 978-80-7361-051-7.
32. Nedestruktivní zkoušení svarů. Praha: Úřadu pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
33. NOVÁK, Miroslav. Remote welding: Svařovací metoda s vysokou produktivitou. [online]. 2013 [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://www.istrojirenstvi.cz/materialy/precist.php?nazev=remote->
34. Nové laserové konfokální mikroskopy pro materiálový výzkum – LEXT OLS 3100 (UV) a LEXT 3000 (IR). Konfokální mikroskopy [online]. 2012, (1) [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: http://ctiv.fs.cvut.cz/podklady/akce/lext/LEXT_Olympus_prispevek.pdf
35. PILOUS, Václav. ŽIVOTNOST SVAROVÝCH SPOJŮ TLAKOVÝCH NÁDOB STABILNÍCH [online]. 2005 [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://www.tlakinfo.cz/docu/clanky/0010/001016o5.jpg>
36. Process Hazards. LASER IN USE DO NOT STARE INTO BEAM [online]. 2014 [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: <http://www.compliancesigns.com/OCE-4220.shtml>
37. Průmyslové lasery. Hlavní typy laserů v průmyslové praxi. 2012, 2012(09). Dostupné také z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-4-hlavni-typy-laseru-v-prumyslove-praxi.html>
38. ROUBÍČEK, Martin. AIRLIQUIDE. LASEROVÉ SVAŘOVÁNÍ [online]. 2013 [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://www.airliquide.cz/file/otherelement/pj/laserove-svarovani49120.pdf>
39. ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. Nekonvenční metody obrábění – 4. díl [online]. 2008 [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvecni-metody-obrabeni-4-dil.html>
40. SCITEC. Laser Modes [online]. 2009 [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: http://www.scitec.uk.com/lasers/laser_modes.php
41. SEMAN, Branislav a Lukáš KOPERNICKÝ. ZÁKLADNÉ TYPY LASEROV [online]. 2002 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://hockicko.uniza.sk/semestralky/prace/p38/typy.htm>
42. SCHMIDOVÁ, Eva. Metalurgické vady svarových spojů. Vyd. 1. Pardubice: Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra mechaniky, materiálů a části [sic] strojů, 2011, 146 s. ISBN 978-80-7395-421-5.

FSI VUT	DIPLOMOVÁ PRÁCA	List 62
---------	-----------------	---------

43. Studijní opora: Skúšanie materiálov a zvarových spojov [cit. 2014-03-18] dostupné z WWW:
http://histproject.no/sites/histproject.no/files/2_02_Sk%C3%BA%C5%A1__materi%C3%A1lov_a_zvar__spojov.pdf
44. Studijní opora: Hodnocení mikrotvrdosti struktur materiálů [cit. 2014-03-18] dostupné z WWW:
<http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/hmsm/index.htm>
45. Spajanie na tvrdo [online]. 2012 [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://medenerozvody.cz/news/rozvod-plynu-z-medenych-rurok>
46. Svařování a příbuzné procesy - Klasifikace geometrických vad kovových materiálů - Část 1: Tavné svařování. Praha: Český normalizační institut, 2008.
47. SVĚTLO, LASEROVÉ ZÁŘENÍ. Therapy [online]. 2009 [cit. 2015-04-27]. Dostupné z: <http://www.therapy.cz/laserove-zareni.php>
48. Štruktúra zvarovného spoja [online]. 2007 [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: http://histproject.no/sites/histproject.no/files/2_07_%C5%A0trukt%C3%BAra_z_v%C3%A1ran%C3%A9ho_zvarov%C3%A9ho_spoja.pdf
49. Teplom ovplyvnená oblasť (TOO) po rezaní laserovým lúčom [online]. 2010 [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://www.ltmetal.net/experimenty/teplom-ovplyvnená-oblasť-po-rezani-laserovym-lucem/>
50. Technologie svařování. SCHWARZ, Drahomír. Hodnocení svarových spojů [online]. [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: http://www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/2009-2_Hodnocen%C3%AD%20svarov%C3%BDch%20spoj%C5%AF.pdf
51. TRUMPF. Inside the keyhole [online]. 2015 [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://www.trumpf-laser.com/en/solutions/applications/inside-the-keyhole.html>
52. TURÁN, ján. Lasery a laserové technológie: fotonika [online]. In: . Košice, 2010 [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: http://www.kemt-old.fei.tuke.sk/predmety/KEMT514_F/materialy/Prednasky/Pr01/FO_1%20Lasery.pdf
53. Výpočet uhlíkového ekvivalentu [online]. 2005 [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: <http://www.svarbazar.cz/phprs/showpage.php?name=cekv>
54. Zváranie. 2005 [online]. [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://www.mtfdca.szm.com/subory/zvaranie2.pdf>

ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV

Skratka	Jednotka	Popis
Ac1		Oblasť v Fe-Fe ₃ C diagrame - 738°C
Ac3		Oblasť v Fe-Fe ₃ C diagrame 912-738°C
c _{ekv}	[-]	Uhlíkový ekvivalent
d	[mm]	Zafokusevaný priemer lúča
d _o	[mm]	Pôvodný priemer lúča
f	[mm]	Ohnisková vzdialenosť šošovky
HRA		Tvrdosť podľa Rockwella
HRB		Tvrdosť podľa Rockwella
HRC		Tvrdosť podľa Rockwella
HV		Tvrdosť podľa Vickersa
I	[A]	Zvárací prúd
MIG	[-]	Zváranie kovov v ochrannej atmosfére inertného plynu.
MAG	[-]	Zváranie kovov v ochrannej atmosfére aktívneho plynu.
Q _s	[kJ.mm ⁻¹]	Špecifické vnesené teplo
P _s	[W]	Zvárací výkon
Ra	[μm]	Drsnosť povrchu
TOO	[-]	Tepelne ovplyvnená oblasť
U	[V]	Zváracie napätie
UV	[-]	Ultra fialové žiarenie
v _s	[mm.s ⁻¹]	zváracia rýchlosť

Skratka	Jednotka	Popis
λ	[-]	koefficient tepelnej vodivosti
μ	[-]	koefficient účinnosti

ZOZNAM OBRÁZKOV A TABULIEK:

Zoznam obrázkov

Číslo obrázku	Popis obrázku	strana
Obr.1 [10.20.21]	Ukážky jadrových vrtákov	11
Obr.2 [22]	Jadrový vrták	12
Obr.3	Rezná doštička	13
Obr.4 [23]	Nosná trubka	13
Obr.5 [1]	Vrtáku s vymeniteľnou reznou doštičkou	13
Obr.6 [45]	Príklad tvrdého spájkovania	14
Obr.7[38]	Príklad zvarovania laserom	14
Obr.8 [12]	Vlnové dĺžky jednotlivých druhov laserov	15
Obr.9 [30]	Optický rezonátor	16
Obr.10 [47]	Typy lúčov	17
Obr.11[39]	Podiel jednotlivých laserových aplikácií	18
Obr.12 [39]	Typy laserov používané na trhu	19
Obr.13 [37]	Vlnové dĺžky jednotlivých typov laseru	20
Obr.14 [41]	Rubínový laser	21
Obr.15 [39]	Nd:YAG laser	22
Obr.16 [52]	Vláknový laser	22
Obr.17 [25]	Polovodičové (diódové) lasery	23
Obr.18 [2]	Atómové lasery	24
Obr.19 [52]	Iontový laser	24
Obr.20 [39]	Molekulové lasery	25
Obr.21 [51]	Interakcia lúča s materiálom	26
Obr.22 [8]	Tvorba zvarového spoja	27
Obr.23 [17]	Princíp kontinuálneho a kondičného zvarovania	28
Obr.24 [33]	Remote welding	28
Obr.25 [4]	Šírenie laserového lúča	29
Obr.26[42]	Typy používaných spojov pri laserovom zvarovaní	30
Obr.27[35]	Trhlina za studena	31
Obr.28 [11]	Schematické zobrazenie skúšky tvrdosti podľa Vickersa	33
Obr.29 [28]	Varovné obrázky-laser	35
Obr.30	Rezná doštička	36
Obr.31	Zvárací stroj	37
Obr.32	Konštrukcia prípravku	39
Obr.33	Proces zvarovania	40
Obr.34	Zvarový spoj	40
Obr.35	Prvá zvarená dvojica	41
Obr.36	Druhá zvarená dvojica	41
Obr.37	Tretia zvarená dvojica	42
Obr.38	Štvrtá zvarená dvojica	42
Obr.39	Porovnanie zvarov	42
Obr.40	Prípravok 3D	44
Obr.41	Rozložený prípravok	45

FSI VUT	DIPLOMOVÁ PRÁCA	List 65
---------	-----------------	---------

Obr.42	Tvorba metalografického výbrusu	45
Obr.43	Metalografický výbrus	46
Obr.44	Výstup EDX analýzy	47
Obr.45[14]	Fe-Co diagram	47
Obr.46	Štruktúra spoja 1-2	49
Obr.47	Detail štruktúra spoja 1-2	49
Obr.48	Štruktúra spoja 3-4	50
Obr.49	Detail štruktúra spoja 3-4	51
Obr.50	Štruktúra spoja 7-8	51
Obr.51	Jadrový vrták a jeho výroba	55

Zoznam tabuliek

Číslo tabuľky	Popis obrázku	strana
Tabuľka 1[26]	Tabuľka zvariteľnosti materiálov	26
Tabuľka 2 [54]	Pásmo ovplyvnených oblastí podľa druhu technológie	30
Tabuľka 3[29]	Príklady najvyšších prípustných hodnôt žiarenia	34
Tabuľka 4 [39]	Základný prehľad priemyslových laserov	36
Tabuľka 5 [7]	Mechanické vlastností ocele	38
Tabuľka 6 [7]	Chemické zloženie ocele	38
Tabuľka 7	Parametre zvarovania	40
Tabuľka 8	Chemické zloženie reznej doštičky	46
Tabuľka 9	Legenda pre rozbor makroštruktúry	48
Tabuľka 10	Tabuľka tvrdosti vzorka 1	52
Tabuľka 11	Tabuľka tvrdosti vzorka 4	52
Tabuľka 12	Tabuľka tvrdosti vzorka 8	53
Tabuľka 13	Vyhodnotenie skúšok	54
Tabuľka 14	Výsledné parametre zvarovania	54
Tabuľka 15	Cena laserového zvarovania	56
Tabuľka 16	Porovnanie nákladov	56
Tabuľka 17	Cena jadrových vrtákov od firmy STYROTHERM	57

PRÍLOHY

Príloha 1 Výkresová dokumentácia prípravku

Príloha 2 Popis IPG YLS-2000

Príloha 3 Tvrdosť fotodokumentácia